This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

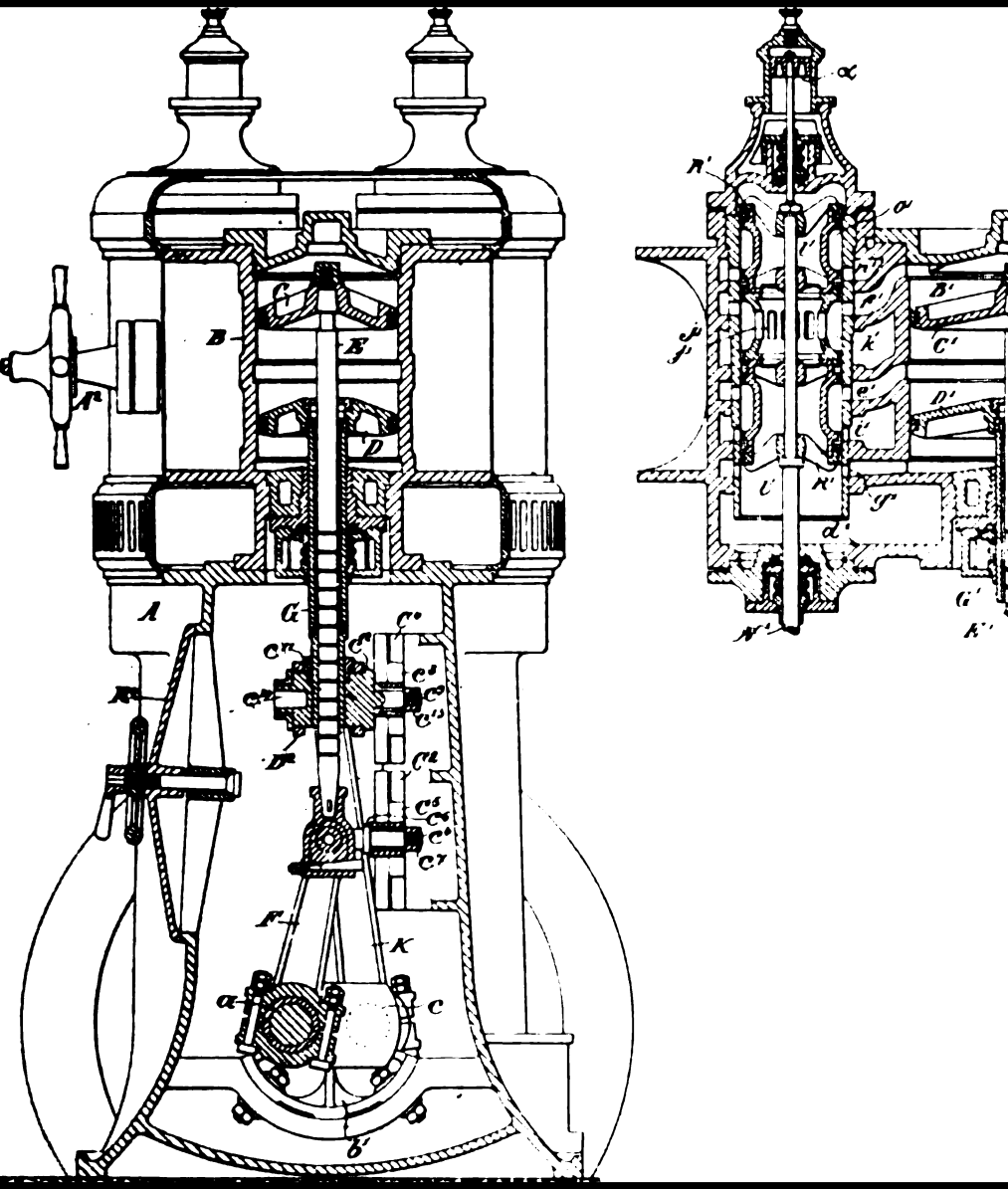
Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`



Annales des mines

France. Commission des Annales des mines

Digitized by Google

Digitized by Google

Storage
Natural Science
Library
TN
2
.A6

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

ANNALES

DES MINES

Digitized by Google

Les Annales des Mines sont publiées sous les auspices de l'Administration des Mines et sous la direction d'une Commission spéciale, nommée par le Ministre des Travaux publics. Cette Commission, dont font partie le directeur des routes, de la navigation et des mines et le directeur du personnel et de la comptabilité, est composée ainsi qu'il suit :

MM.

Haton de la Goupillière, insp. gén., *président*.

Lorieux, inspecteur général.

Aguillon, insp. gén., professeur à l'Ecole supérieure des mines.

Carnot, insp. gén., directeur de l'Ecole supérieure des mines.

Keller, insp. gén., secrétaire de la Commission de la statistique de l'industrie minérale.

Worms de Romilly, insp. gén.

Nivoit, d°

Delafond, d°

Duporcq, d°

Cheysson, insp. gén. des ponts et chaussées, professeur à l'Ecole supérieure des mines.

MM.

Potier, ingénieur en chef, prof. à l'Ecole supérieure des mines.

Douvillé, d°

Bertrand, d°

Le Chatelier, d°

Lodin, d°

Pelletan, ing. en chef, inspecteur de l'Ecole supérieure des mines.

Sauvage, ingénieur en chef, prof. à l'Ecole supérieure des mines.

Chesneau, d°

Humbert, d°

Termier, d°

Beaugey, d°

De Launay, d°

Lebreton, d°

Zeiller, ingénieur en chef, *secrétaire de la Commission*.

L'Administration a réservé un certain nombre d'exemplaires des Annales des Mines pour être envoyés soit, à titre de don, aux principaux établissements nationaux et étrangers consacrés aux sciences et à l'art des mines, soit à titre d'échange, aux rédacteurs des ouvrages périodiques, français et étrangers, relatifs aux sciences et aux arts.

Les lettres et documents concernant les Annales des Mines doivent être adressés, *sous le couvert de M. le Ministre des Travaux publics*, à M. l'ingénieur en chef, secrétaire de la Commission des Annales des Mines.

Les auteurs reçoivent *gratis* 20 exemplaires de leurs articles.

Ils peuvent faire faire des tirages à part, à raison de 9 francs par feuille jusqu'à 50, 10 francs de 50 à 100, et 5 francs en plus pour chaque centaine ou fraction de centaine à partir de la seconde. — Le tirage à part des planches est payé 10 francs par planche et par cent exemplaires ou fraction de centaine. Les planches extraordinaires sont payées au prix de revient.

Le brochage, y compris couverture imprimée et faux frais, est payé, pour une feuille seule ou une fraction de feuille, 3 francs le premier cent et 1f,25 pour chaque centaine ou fraction de centaine en plus. Pour chaque planche, ou chaque nouvelle feuille de texte, il sera payé 0f,25 par chaque centaine d'exemplaires.

La publication des Annales des Mines a lieu par livraisons, qui paraissent tous les mois.

Les douze livraisons annuelles forment trois volumes, dont deux consacrés aux matières scientifiques et techniques, et un consacré aux actes administratifs et à la jurisprudence. Ils contiennent ensemble 120 feuilles d'impression et 24 planches gravées environ.

Le prix de l'abonnement est de 20 francs pour Paris, de 24 francs pour les départements et de 28 francs pour l'Etranger.

Tours. — Imprimerie Deslis Frères.

Digitized by Google

ANNALES
DES MINES

OU

RECUEIL

DE MÉMOIRES SUR L'EXPLOITATION DES MINES

ET SUR LES SCIENCES ET LES ARTS QUI S'Y RATTACHENT

PUBLIÉES

SOUS L'AUTORISATION DU MINISTRE DES TRAVAUX PUBLICS.

DIXIÈME SÉRIE.

MÉMOIRES. — TOME I.

PARIS

Vve Ch. DUNOD, ÉDITEUR

49, Quai des Grands-Augustins, 49

—

1902

Digitized by Google

Digitized by Google

ANNALES
DES MINES

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES
SUR
ÉCOULEMENT DE LA VAPEUR D'EAU
PAR DES TUYÈRES CONVERGENTES ET DES ORIFICES EN MINCE PAROI

Par M. A. RATEAU, Ingénieur au Corps des Mines.

---

1. Le fonctionnement des turbines à vapeur repose sur l'écoulement à grande vitesse de ce fluide. Il est donc nécessaire, pour calculer ces machines convenablement, de connaître à fond le phénomène de l'écoulement des vapeurs. Comme on ne trouve sur ce sujet, dans les ouvrages de mécanique et de thermodynamique, que des notions succinctes et incomplètes (et même quelquefois erronées), j'ai dû entreprendre des recherches expérimentales étendues et précises, pour vérifier les données de la thermodynamique.

C'est le résultat de ces recherches, faites en 1895-96, que je vais donner ici. On verra que les formules théoriques, correctement interprétées, sont très exactement vérifiées, et même que les résultats expérimentaux permettent de déterminer à quelques unités près l'équivalent mécanique de la calorie.

Avant de décrire la méthode employée, je rappellerai sommairement la théorie du phénomène.

Digitized by Google

2. Théorie. — L'écoulement des fluides élastiques par des tuyères diffère considérablement de l'écoulement des liquides dès que le rapport $\frac{p}{P}$ de la pression d'aval p à la pression d'amont P est notablement inférieur à l'unité.

Soient :

s, la section transversale de la tuyère en un point quelconque ;
V, la vitesse d'écoulement du fluide en ce point ;
Q, le débit en volume du fluide dans la section s ;
ϖ, le poids spécifique moyen du fluide à l'état où il se trouve (homogène ou hétérogène) en traversant la section s.

On a tout d'abord pour expression du débit Q :

$$Q = Vs;$$

et le débit en poids I, égal à ϖQ, est lié à la section s et à la vitesse V par la formule ci-après :

$$(1) \qquad I = \varpi V s.$$

Si ϖ est constant, ce qui est le cas des liquides, la section s est inversement proportionnelle à V, et V augmente toujours, par conséquent, quand s décroît. Mais il n'en est plus de même avec les fluides élastiques : à mesure que la pression s'abaisse, ϖ décroît pendant que V croît, en sorte que le produit ϖV, d'abord croissant, passe par un maximum pour décroître ensuite. Dans le cas des gaz, le maximum a lieu pour un rapport $\frac{p}{P}$ des pressions égal à 0,52 : et, avec la vapeur d'eau, il a lieu quand ce rapport est voisin de 0,58, quelle que soit la pression P d'amont (*). Je donnerai plus loin le calcul de ce maximum.

Ainsi, lorsque la pression d'aval p est plus basse que

(*) La valeur de ce rapport $\frac{p}{P}$ qui rend ϖV maximum semble cependant dépendre un peu, dans le cas des vapeurs, de la grandeur de P.

Digitized by Google

0,58 P, il est nécessaire que la tuyère d'écoulement, d'abord convergente, devienne ensuite divergente, si l'on veut que la vapeur continue de s'y détendre de manière que la vitesse atteigne la valeur qui correspond à la chute de pression de P à p ; et le rapport de la section finale s_1 de la tuyère à la section s_c au col (*) devra varier avec le rapport $\frac{p}{P}$ des pressions. Dans le col, la pression est toujours égale à 0,58 P, et la vitesse (qui ne dépend que de P) ne diffère pas, ainsi qu'Hugoniot l'a établi (**), de la vitesse du son dans le fluide à l'état où il s'y trouve.

Si, la tuyère étant construite, on abaisse la pression d'aval p au-dessous de la valeur p_1 qui correspond au rapport $\frac{s_1}{s_c}$ des sections de sortie et du col, la pression du fluide à la fin de la tuyère n'est pas p, mais p_1, laquelle est dans un rapport fixe avec la pression d'amont P. A la sortie de la tuyère, le fluide, entrant brusquement dans une enceinte où la pression est plus basse que la sienne, fait en quelque sorte explosion ; c'est pourquoi on voit la veine fluide se renfler en forme de paraboloïde. Le renflement de la veine cesse dès que la pression d'aval atteint la valeur p_1.

Quant au débit de vapeur, il est indépendant de la pression d'aval dès que celle-ci est inférieure à 0,58 P, tandis qu'il en dépend, au contraire, quand p est plus grand que 0,58 P. Il y donc lieu de distinguer deux cas très différents. Dans le premier, le calcul du débit ne dépend que de P et la formule est simple; dans le deuxième, il dépend à la fois de P et de p.

Pour les deux cas, d'ailleurs, c'est la section la plus

(*) J'appelle « col » de la tuyère convergente-divergente, la partie la plus rétrécie.

(**) *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. CIII, 1886, p. 100.

Digitized by Google

rétrécie de la tuyère (au col, si elle est convergente-divergente, ou à la sortie, si elle est seulement convergente) qu'il faut faire intervenir dans le calcul du débit.

Ce qui précède ne s'applique, bien entendu, qu'aux tuyères proprement dites. S'il s'agit d'orifices en mince paroi, le coefficient de contraction K, qui varie beaucoup avec le rapport $\frac{p}{P}$ des pressions, complique le phénomène. Nous verrons plus loin les valeurs expérimentales de ce coefficient.

3. Formule de la vitesse. — La vitesse V de la vapeur peut se calculer par deux voies différentes : ou bien par la mécanique ordinaire, quand on connaît la relation entre le volume spécifique v et la pression p, ou bien par la thermodynamique, quand on dispose des constantes calorifiques de la vapeur, c'est-à-dire des tables de Regnault pour la vapeur d'eau.

La première méthode donne la formule générale dite de Weisbach :

$$\frac{V^2}{2g} = \int_p^P v dp \tag{2}$$

(déjà indiquée par Wantzel et de Saint-Venant, en 1839), que l'on pourra intégrer si l'on a la relation entre v et p.

Il faut toujours supposer, dans l'écoulement des fluides par les tuyères, que la détente est adiabatique, car le fluide reste si peu de temps dans la tuyère (quelques dix-millièmes de seconde) qu'il ne peut céder ou recevoir une quantité de chaleur appréciable. Or, on sait que, pour le cas de la détente adiabatique de la vapeur d'eau initialement saturante, Zeuner a montré (*) qu'on avait approxi-

(*) *Théorie mécanique de la chaleur* Traduction Arnthal et Cazin, p. 331.

Digitized by Google

mativement dans de larges limites de pression :

$$(3) \qquad pv^{\gamma} = \text{constante},$$

comme pour les gaz, mais avec $\gamma = 1,135$ au lieu de 1,41.

En portant v, tiré de cette relation, dans la relation précédente, on obtient V en fonction de P et p. Tenant compte, d'autre part, de la formule empirique, indiquée par Zeuner ($\varpi = 0,587\ p^{0,94}$), qui donne le poids spécifique de la vapeur en fonction de la pression, on trouve pour formule du débit, lorsque p égale 0,58 P :

$$(4) \qquad I = 15,26\ P^{0,97},$$

I étant le débit de vapeur en grammes par seconde et par centimètre carré d'orifice.

Cette formule a été donnée par le Dr Grashof (*Theoretische Maschinenlehre*, t. I, § 111).

D'après la deuxième méthode, développée par Zeuner, l'énergie cinétique $\frac{V^2}{2g}$ de l'unité de poids du fluide doit, quand la détente dynamique s'est effectuée de P à p, être égale à l'énergie représentée par le diagramme entropique.

Soient :

T_0 la température de vapeur saturante correspondant à P,
T_1 celle qui correspond à la pression p.

Traçons le diagramme d'entropie (*fig.* 1), avec l'entropie S en abscisse et la température absolue T en ordonnée. AE et DF sont les isothermes de ces températures T_0 et T_1. AD est la courbe d'entropie de l'eau et EF la ligne de la vapeur saturante. Soit B le point qui correspond à l'état de la vapeur en amont de la tuyère au moment où elle va y pénétrer. On sait que les poids relatifs du liquide et de la vapeur, dans le mélange fluide représenté par le point B, sont entre eux comme les deux segments

Digitized by Google

BE et BA (Nous supposons ici, pour plus de généralité, que le fluide peut, à l'origine, ne pas être à l'état de vapeur saturante). BC est la ligne de détente du fluide dans la tuyère ; si cette détente est adiabatique, BC est une droite parallèle à l'axe des températures.

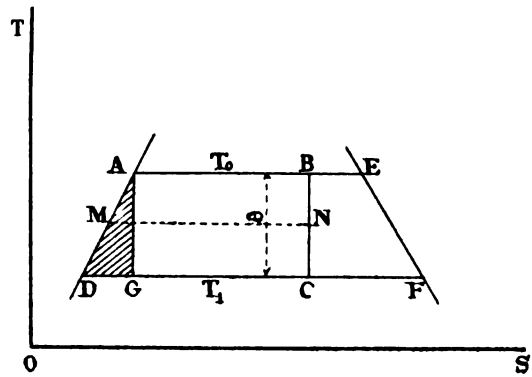


Fig. 1.

L'énergie mécanique totale développée par le fluide pendant sa détente complète de la pression P à la pression p est représentée sur le diagramme par l'aire du trapèze ABCD. Cette aire a pour expression simple θL, en appelant θ sa hauteur, c'est-à-dire la chute de température de T_0 à T_1, et en représentant par L sa largeur moyenne MN.

Quand la chute θ de température est faible, cette largeur moyenne L peut être, en pratique, prise égale à la moyenne des deux bases AB et CD. Mais, si l'on veut la formule exacte, il faut décomposer le trapèze dans le rectangle ABCG égal à θ. AB, et dans le triangle, à hypoténuse curviligne, AGD. Si la vapeur est initialement saturante, AB égale $\frac{r}{T_0}$, r étant la chaleur de vaporisation de l'eau à la température T_0.

Digitized by Google

La formule de la vitesse est donc, en introduisant le coefficient E, équivalent mécanique de la calorie,

$$V^2 = 2gE\theta L. \tag{5}$$

Quand la vapeur est initialement saturante, on peut écrire :

$$V^2 = 2gE\theta\left(\frac{r}{T_0} + \frac{C\theta}{2T'}\right), \tag{6}$$

C étant la chaleur spécifique du liquide, et T′ étant voisin de la moyenne arithmétique $\frac{1}{2}(T_0 + T_1)$ des températures extrêmes.

Telle est, sous son expression la plus simple, la formule qui sert à calculer la vitesse d'écoulement de la vapeur. On voit qu'elle suppose la connaissance : 1° des températures qui correspondent aux pressions; 2° des chaleurs de vaporisation du liquide; 3° de la chaleur spécifique du liquide. Ces renseignements sont donnés, en ce qui concerne l'eau, par les tables de Regnault, avec une approximation plus que suffisante pour la pratique.

4. Calcul du débit en poids. — Pour calculer le débit en poids, il faut d'abord avoir calculé la vitesse, puis évaluer le poids spécifique de la vapeur dans la section de la tuyère considérée, enfin tenir compte de la quantité de liquide qui s'est formée pendant la détente adiabatique et qui est entraînée dans la vapeur, en faisant avec elle un mélange probablement homogène.

Le poids spécifique ϖ de la vapeur d'eau se déduit des tables de Regnault, à l'aide de la formule de Clapeyron. Il a été calculé une fois pour toutes et se trouve habituellement dans une colonne supplémentaire des tables tirées de celles de Regnault. Quant à la quantité de

Digitized by Google

liquide formée, il faut la calculer d'après le diagramme d'entropie, ou la relever sur un abaque tracé une fois pour toutes, comme celui que j'ai donné dans mon rapport au Congrès International de mécanique appliquée.

Ainsi s'obtient la proportion d'eau $1 - x$.

Si on néglige le volume spécifique du liquide vis-à-vis de celui de la vapeur (qui est plusieurs centaines de fois plus grand), on aura pour le débit en poids,

$$I = \frac{\varpi s V}{x}.$$

Inversement, étant donné un poids I de fluide coulant par une tuyère, on peut, par cette formule, calculer la section transversale nécessaire à l'écoulement de ce poids I quand la pression a pris une valeur quelconque p. Nous allons voir un exemple de ce calcul.

Auparavant, nous devons remarquer que les deux méthodes employées pour calculer la vitesse et le débit de vapeur, différentes dans la forme, sont identiques au fond, parce que c'est précisément des tables de Regnault que Zeuner a tiré la formule empirique reliant à la pression le volume spécifique du mélange de vapeur et de liquide pendant la détente adiabatique; en sorte que c'est toujours, en définitive, aux tables de Regnault, c'est-à-dire aux données de la thermodynamique, qu'il faut en venir.

5. Profil des tuyères à vapeur. — Voici dans le tableau ci-après, à titre d'exemple, le calcul des vitesses d'écoulement de la vapeur initialement saturante, à partir de la pression $P = 10$ kilogrammes par centimètre carré.

La première colonne de ce tableau donne la pression p pour laquelle on veut calculer la vitesse.

La seconde colonne indique la chute θ de température,

Digitized by Google

c'est-à-dire la différence des températures qui correspondent aux pressions P et p.

La troisième colonne donne la valeur de ce que nous avons appelé précédemment L, c'est-à-dire la somme

$$\frac{r}{T} + \frac{\theta}{2T'}, \quad \text{où} \quad T' = T - \frac{\theta}{2}, \text{ approximativement.}$$

La quatrième colonne exprime alors la vitesse d'écoulement V en mètres par seconde, calculée d'après la formule précédente (6).

Calcul des vitesses et des sections théoriques d'écoulement de la vapeur d'eau saturante. — Pression initiale, 10 kg/cm².

λ est le rapport du rayon de la section d'écoulement correspondant à la pression indiquée dans la première colonne, au rayon de la section du col de la tuyère.

p kg/cm²	θ	$\frac{r}{T} + \frac{\theta}{2T-\theta}$	V m/sec	ϖ	ϖV	x	$1.000 \frac{x}{\varpi V}$	λ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10								
9	4°,521	1,0673	200,554	4,6160	925,757	0,9933	1,0730	1,2358
8	9 ,427	1,0728	290,347	4,1331	1.200,032	0,9858	0,8215	1,0813
7	14 ,862	1,0791	365,629	3,6467	1.333,338	0,9767	0,7325	1,0210
6	20 ,943	1,0860	435,417	3,1558	1.374,012	0,9673	0,7041	1,0009
5,9	21 ,596	1,0868	442,330	3,1065	1.374,100	0,9661	0,7031	1,00024
5,8	22 ,258	1,0875	449,188	3,0570	1.373,169	0,9650	0,70276	1.
5,75	22 ,594	1,0879	452,650	3,0322	1.372,523	0,9646	0,70279	1,00007
5,7	22 ,929	1,0883	456,076	3,0075	1.371,650	0,9642	0,70295	1,00015
5,6	23 ,610	1,0892	462,991	2,9580	1.369,528	0,9632	0,70331	1,00042
5,4	24 ,999	1,0908	476,765	2,8589	1.363,024	0,9607	0,70483	1,0015
5	27 ,899	1,0942	504,445	2,6596	1.341,620	0,9562	0,71272	1,0071
4	36 ,078	1,1038	576,152	2,1572	1.242,875	0,9432	0,75885	1,0392
3	46 ,088	1,1159	654,753	1,6466	1.078,116	0,9279	0,86067	1,1066
2	59 ,326	1,1328	748,580	1,1250	842,150	0,9068	1,0768	1,2378
1	79 ,808	1,1591	878,121	0,5860	514,579	0,8756	1,7016	1,5563
0,8	85 ,884	1,1673	914,152	0,4749	434,131	0,8654	1,9934	1,6842
0,6	93 ,404	1,1775	957,490	0,3621	346,707	0,8535	2,4617	1,8718
0,4	103 ,425	1,1914	1.013,470	0,2470	250,328	0,8374	3,3452	2,1820
0,3	110 ,148	1,2011	1.050,140	0,1882	197,637	0,8259	4,1789	2,4386

Dans la cinquième colonne, on trouve la valeur du poids spécifique ϖ, qui correspond à la pression p.

La sixième colonne contient le produit ϖV.

Dans la septième colonne, se trouve indiqué le titre x en vapeur du mélange qui s'écoule quand il est parvenu à la presion p, adiabatiquement. C'est à l'aide du dia-

Digitized by Google

gramme d'entropie que ce titre x est calculé, ou, ce qui revient au même, par la formule de Zeuner :

$$\frac{r_1 x_1}{T_1} = \frac{r_0 x_0}{T_0} - C \log \frac{T_1}{T_0}.$$

Dans la huitième colonne, est indiqué le quotient de x par ϖV, ou plutôt, pour éviter d'écrire beaucoup de zéros, la valeur de mille fois ce quotient :

$$1.000 \frac{x}{\varpi V}.$$

Les sections d'écoulement d'une tuyère devant débiter un poids déterminé de vapeur, seraient proportionnelles à cette quantité $1.000 \frac{x}{\varpi V}$. Pour les avoir en valeur absolue, il faudrait se donner un débit I de vapeur déterminé.

En examinant les nombres inscrits dans cette colonne, on remarque que les sections d'écoulement, d'abord décroissantes jusqu'à $p = 0{,}58$ P, vont ensuite en croissant indéfiniment. C'est pour déterminer aussi bien que possible la position du minimum que nous avons resserré les intervalles des pressions p dans le voisinage de la valeur 0,58 P. En traçant la courbe de la quantité $\frac{1.000x}{\varpi V}$ en fonction de la pression p, on détermine, avec une approximation aussi grande que le permettent les tables de Regnault, la position et la valeur du minimum.

On pourrait répéter les mêmes calculs en partant d'une pression initiale quelconque ; je me suis livré à ce fastidieux exercice pour quelques pressions initiales échelonnées. J'ai constaté alors que la position du minimum varie légèrement avec la pression P, autour de la valeur 0,58 P.

Prenons la racine carrée de la quantité $\frac{1.000\,x}{\varpi V}$ et for-

Digitized by Google

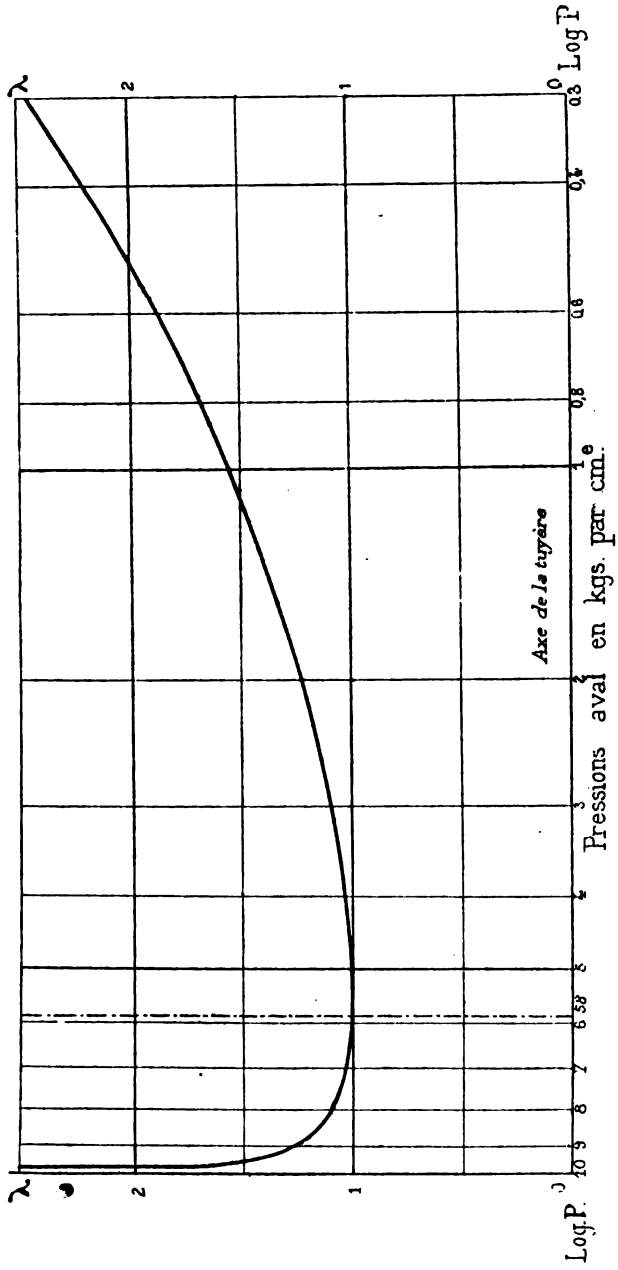

λ
2
1
0
Log P
0,3
0,4
0,6
0,8
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
Axe de la tuyère
Pressions aval en kgs. par cm.e
Log.P.

FIG. 2.

mons le rapport de cette racine carrée à sa plus petite valeur ; nous avons alors une quantité que nous appellerons λ et à laquelle seraient proportionnels les rayons ou les diamètres d'une tuyère, à sections circulaires, par laquelle l'écoulement de la vapeur aurait lieu. Les valeurs de λ sont inscrites dans la dernière colonne du tableau. En portant en abscisse soit p, soit une fonction quelconque de p (par exemple le logarithme de p), et, en ordonnée, la valeur de λ, on peut représenter le profil longitudinal des tuyères servant à l'écoulement des vapeurs. La *fig.* 2 donne cette courbe, qui nous sert effectivement à calculer rapidement les tuyères des turbines à vapeur dans chaque cas particulier.

On utilise cette courbe de la manière suivante : Ayant la pression initiale P et la pression finale p, à laquelle la vapeur doit se détendre, on relève l'ordonnée de la courbe qui correspond à l'abscisse marquée par la valeur du rapport $\frac{p}{P}$. Cette ordonnée indique le rayon de la section finale de la tuyère, la section au col ayant pour rayon l'ordonnée minimum de la courbe.

La courbe serait, il est vrai, un peu différente suivant la pression initiale ; mais, pour les besoins de la pratique, la variation peut être négligée.

6. **Formule pratique du débit.** — Lorsque la tuyère d'écoulement est convergente, et que la pression d'aval p est plus petite que 0,58 P, le débit ne dépend que de P, parce qu'alors la pression p à la sortie de la tuyère est toujours égale à 0,58 P. Si l'on fait le calcul du débit I par unité de section de l'orifice de sortie de la tuyère, ou plutôt le calcul du rapport $\frac{I}{P}$ qui varie peu, on trouve des résultats tels que ceux indiqués dans le tableau ci-après.

Digitized by Google

Tableau des valeurs théoriques de $\frac{I}{P}$.

P	p	θ	$\frac{r}{T} + \frac{\theta}{2T - \theta}$	V	ϖ	x	$\frac{\varpi V}{10x}$	$\frac{I}{P}$
Kgs/cm²	Kgs/cm²	degrés		m/sec	Kgs/m³			
10	5,8	22°,258	1,0875	449,19	3,0570	0,9650	142,30	14,23
5	2,9	19 ,337	1,2028	439,85	1,5950	0,9650	72,70	14,54
2	1,16	16 ,310	1,3530	428,42	0,6738	0,9670	29,85	14,92
1	0,58	14 ,459	1,4639	420,04	0,3507	0,9697	15,19	15,19

La formule théorique $\frac{I}{P} = 15,20 - 0,96 \log P$ donne bien les chiffres de la dernière colonne à une unité près du dernier ordre.

Digitized by Google

Cherchons la fonction qui relie la valeur de ce rapport à la pression P; pour cela, portons en abscisses, non pas des longueurs proportionnelles à P, mais des longueurs proportionnelles à log P, et en ordonnées, les valeurs du rapport $\frac{I}{P}$ trouvées d'après les tables de Regnault. Nous remarquons que les points ainsi obtenus viennent se ranger presque rigoureusement sur une ligne droite depuis P = 1 kilogramme par centimètre carré jusqu'à P = 13 kilogrammes par centimètre carré. Les écarts ne dépassent pas 1 millième, ainsi qu'on le voit sur la figure de la Pl. II, où les points théoriques calculés sont marqués par des points entourés de cercles. L'on peut donc écrire la formule empirique très simple suivante :

$$\frac{I}{P} = a - b \log P, \tag{7}$$

a et b étant deux constantes dont les valeurs les plus convenables sont : $a = 15{,}20$ et $b = 0{,}96$, le débit étant, nous le répétons, estimé en grammes par seconde et par centimètre carré de l'orifice de sortie de la tuyère.

Cette formule peut être aussi remplacée par la suivante, qui lui est à peu près équivalente en pratique, comme l'on sait $\left(\frac{b}{a}\text{ étant petit}\right)$:

$$I = aP^{1 - \frac{b}{a} \log e}, \tag{8}$$

e étant la base des logarithmes naturels ; ou bien, en chiffres,

$$I = 15{,}20\ P^{0{,}9725}. \tag{9}$$

Cette forme est celle de Grashof (la formule de Grashof est $I = 15{,}26\ P^{0{,}9696}$, quand on suppose le coefficient de dépense égal à l'unité) (*).

(*) Dans certains ouvrages allemands, on donne comme formule de Grashof une formule dont le coefficient est un peu plus faible que 15,26 (de 1 p. 100 environ) pour tenir compte de la contraction de la veine.

Digitized by Google

Pour les applications, la première forme est la plus commode. C'est celle que je préconise.

Nous verrons que nos expériences conduisent à augmenter un peu le coefficient 15,20 et à le porter précisément à la valeur 15,26 adoptée par Grashof.

EXPÉRIENCES.

7. **Expériences précédentes.** — Avant le travail que je vais maintenant exposer et dont je donnerai les résultats complets, on possédait quelques séries d'expériences sur l'écoulement de la vapeur d'eau : notamment, en France, celles de Minary et Résal (*) en 1861, puis, plus récemment, celles de M. H. Parenty (**) en 1891 ; en Amérique, celles de Napier (***) en 1866, puis celles de Peabody et Kunhard (****) en 1888-1890, Miller et Read (*****) en 1895 ; en Angleterre, celles toutes récentes de Rosenhain (******) en 1899. Tous ces auteurs ont opéré avec la même méthode, consistant à recueillir la vapeur, après qu'elle a traversé la tuyère en essai, dans un condenseur de surface où elle se réduit à l'état d'eau, et à peser l'eau qui se trouve ainsi condensée pendant un certain laps de temps.

Mais cette méthode, qu'on peut appeler méthode directe, présente plusieurs inconvénients :

1° On ne peut sans difficulté opérer sur de grandes tuyères, car il faudrait alors un condenseur relativement énorme pour des expériences, et pourtant il y a utilité à se servir de grandes tuyères, d'abord pour se rapprocher

(*) *Annales des Mines*, 5e série, t. IX.
(**) *Annales de Chimie et de Physique*, mai 1896.
(***) *On the velocity of steam and other gases*, Spon, 1866.
(****) *American Society of Mechanical Engineers*, 1890.
(*****) *Technology quaterly* de Boston, 1895, vol. VIII.
(******) *Experiments on steam-jets* (*Proc. of the Civil Engineers*, 1900).

Digitized by Google

des conditions de la pratique, et ensuite afin de diminuer l'influence des frottements et l'influence thermique des parois ;

2° La durée des séries d'essais est nécessairement longue, puisque, pour chaque mesure, il faut attendre que l'on ait un poids d'eau condensée suffisant, ce qui conduit à faire durer chaque essai dix à quinze minutes ;

3° La méthode comporte peu de précision, à cause des variations incessantes de la pression aux chaudières. Il est, en effet, bien difficile de tenir la pression d'une chaudière à peu près constante pendant une dizaine de minutes, et les variations se répercutent jusqu'à la tuyère. On doit dès lors prendre des moyennes, ce qui complique et devient peu précis ;

4° Enfin, on pèse avec la vapeur écoulée l'eau qu'elle entraine, et la mesure est alors faussée d'une quantité relative presque égale à la proportion d'eau. C'est pourquoi les résultats obtenus sont généralement exagérés. Ainsi, on voit sur le diagramme de la Pl. II, où j'ai marqué par des triangles les résultats des expériences de Résal, que ces expériences ont donné en moyenne une exagération de 3 p. 100. Celles de Rosenhain et des autres auteurs donnent des résultats analogues.

8. Expériences actuelles. — Pour s'affranchir de ces causes d'erreur, il faut s'arranger de façon à exécuter toutes les lectures dans un instant très court, lorsque le régime permanent de l'écoulement est suffisamment établi. Les expériences deviennent alors rapides et précises. Je suis parvenu à ce résultat par l'application d'une méthode nouvelle, indirecte, consistant à condenser la vapeur qui s'est écoulée par la tuyère dans un courant d'eau très froide et à mesurer simultanément le débit total du courant et l'élévation de température de l'eau. Cette méthode est fondée sur l'emploi d'un éjecto-condenseur

Digitized by Google

Le débit total du courant d'eau, après condensation de la vapeur, est évalué par l'écoulement de ce courant à travers une tuyère conique, sous une hauteur de charge que l'on mesure avec soin. Connaissant le débit Q total et l'élévation de température θ, on en déduit le débit X de vapeur en poids, d'après la chaleur spécifique C et la chaleur totale de formation λ de la vapeur d'eau, par la formule :

$$X = Q \frac{C\theta}{\lambda - Ct_0}, \tag{10}$$

t_0 étant la température initiale de l'eau.

Les avantages de cette méthode sont évidents. La durée de chaque essai individuel n'excédait pas deux à trois minutes. Il suffisait d'une minute environ pour que le régime permanent fût établi ; et, lorsque tous les appareils de lecture étaient devenus stables, on avait fait en quelques secondes le relevé de leurs indications ; puis on changeait les conditions de pression, et ainsi de suite. Quant à l'exactitude, voici sur quoi j'estime pouvoir compter.

9. Estimation de la précision des mesures. — Les écarts de température étaient en moyenne de 20° et la mesure de chacune des températures à l'amont et à l'aval de l'éjecto-condenseur était faite à $\frac{1}{20}$ de degré près, d'où une erreur moyenne de $\frac{1}{400}$. Toutefois, il s'est introduit, ainsi que je le dirai plus loin, une cause d'erreur assez importante : le déplacement du zéro du thermomètre de l'aval pendant le cours des mesures. Ce déplacement a pu atteindre 2 dixièmes de degré, soit près de 1 p. 100, ou un demi pour cent en plus ou en moins. Les pressions d'amont et d'aval étaient estimées par différents mano-

Digitized by Google

mètres : d'abord des manomètres métalliques, et ensuite un manomètre à mercure pourvu de robinets à trois voies de manière à pouvoir mettre les branches du manomètre en communication, soit avec l'atmosphère, soit avec l'intérieur des tuyaux, lorsque la pression, ou la différence des pressions, ne dépassait pas 1 kilogramme par centimètre carré ; je pouvais donc mesurer par le manomètre à mercure soit la pression d'amont, soit la pression d'aval, soit la différence de ces pressions. La lecture principale était celle de la pression d'amont P ; je la faisais ordinairement à l'aide d'un grand manomètre métallique de Bourdon, fabriqué tout spécialement pour mes expériences et donnant le centième de kilogramme, ce qui, pour 5 kilogrammes de pression moyenne, correspond à une approximation moyenne de 2 millièmes.

La hauteur de charge H sur la tuyère d'écoulement de l'eau s'élevait en moyenne à 450 millimètres ; comme l'erreur de lecture était inférieure à $\frac{1}{2}$ millimètre, on voit que l'erreur d'appréciation sur le débit ne pouvait dépasser $\frac{1}{1.800}$ en moyenne.

Pour évaluer le débit d'après cette hauteur H, il a fallu préalablement faire le jaugeage de la tuyère à eau ; j'estime à quelques millièmes au plus l'erreur qui a pu s'introduire dans ce jaugeage, qui sera décrit plus loin.

Le diamètre des tuyères à vapeur a été relevé avec grande précision à l'aide de mandrins calibrés au centième de millimètre. Comme le diamètre moyen était de 15 millimètres, l'erreur sur le diamètre peut atteindre $\frac{1}{1.500}$ et, sur la section, $\frac{1}{750}$.

Une cause d'erreur assez difficile à éliminer est la dilatation des tuyères pendant que la vapeur les traverse. On sait que le coefficient de dilatation du bronze est de

Digitized by Google

$\frac{1}{600}$. La température de l'extrémité de la tuyère ne peut pas être connue avec certitude, mais on peut l'évaluer, certainement, à une quarantaine de degrés près, et cela est suffisant, car l'erreur qui en résulte est moindre de $\frac{1}{1.500}$ sur le diamètre ou $\frac{1}{750}$ sur la section.

On voit donc, en résumé, que toutes les erreurs individuelles des différentes lectures, le déplacement du zéro du thermomètre d'aval mis à part, sont de l'ordre de 1 à 2 ou 3 millièmes. En s'ajoutant, elles ont pu donner lieu à des erreurs accidentelles totales, sur les résultats calculés, dépassant 1 p. 100, mais, dans l'ensemble, si l'on prend la moyenne, cette moyenne doit être très probablement exacte à moins de quelques millièmes près.

Deux causes d'erreurs systématiques doivent être examinées : 1° l'eau entraînée ; 2° l'influence du rayonnement des appareils.

En ce qui concerne l'eau entraînée, il faut remarquer que notre méthode restreint autant que possible cette cause d'erreur, car, en effet, s'il y a, par exemple, 1 p. 100 d'eau entraînée, cette quantité va réduire un peu la vitesse d'écoulement de la vapeur à travers l'orifice ; elle tendra, par conséquent, à diminuer la quantité totale écoulée par seconde ; mais, par contre, cette eau apporte avec elle de la chaleur qui remplacera, en partie, dans le courant, celle qui manque par suite de la réduction du débit de vapeur ; de sorte que, au total, si l'on fait le calcul, on trouve que le déficit relatif réel de chaleur ne sera que la moitié environ de la proportion d'eau ; cette méthode, on le voit, si elle n'élimine pas complètement l'influence de l'eau entraînée, réduit cette influence à la moitié, et, d'ailleurs, l'erreur est en sens contraire de celle de l'autre méthode ; au lieu d'être en plus, elle se présente en moins.

Au surplus, je me suis arrangé pour avoir très peu

Digitized by Google

d'eau entraînée, et même pour mesurer cette eau entraînée. Sur le parcours du tuyau d'amenée de vapeur, un peu avant la tuyère, j'avais placé un séparateur d'eau, et, entre ce séparateur et la tuyère, j'effectuais une prise d'échantillon de vapeur, laquelle était analysée dans un appareil permettant de mesurer l'humidité de la vapeur, appareil spécialement conçu pour cet objet. En pratique, je n'avais plus dans le courant de vapeur, après le séparateur, que 2 à 3 millièmes d'eau au plus, en sorte que l'erreur de mesure causée par l'entraînement d'eau devait être inférieure à 1,5 millième.

Quant à l'influence du rayonnement, bien que les appareils n'étaient pas enveloppés, elle était relativement très faible à cause du grand débit de vapeur. Pour me rendre compte de l'importance de la perte de chaleur par rayonnement, j'ai fait passer dans l'appareil un petit courant de vapeur à la pression atmosphérique, et j'ai recueilli l'eau condensée par le refroidissement des parois. La quantité ainsi obtenue a été de 2,3 kilogrammes dans une heure. Comme la température moyenne des diverses parties exposées au rayonnement entre la tuyère à vapeur et le thermomètre en aval était, pendant les expériences, généralement très inférieure à 100°, on peut admettre que le rayonnement n'équivalait pas à 0,6 kilogramme par heure, alors que le débit était en moyenne de 500 kilogrammes, d'où une perte relative de $\frac{1,2}{1.000}$ au plus.

On observera, au reste, que cette influence du rayonment, de même que celle de l'eau entraînée, n'aurait pu que causer un déficit dans la quantité de vapeur évaluée. Or nous verrons que les résultats expérimentaux donnent des chiffres de débit un peu plus élevés que le calcul théorique fondé sur les tables de Regnault.

Une difficulté s est présentée pour le jaugeage du dé-

Digitized by Google

bit, à cause de l'air contenu dans le courant d'eau. Sous l'influence du vide de l'éjecto-condenseur, cet air, d'abord en dissolution dans l'eau, s'est mis à l'état libre, et il reste dans cet état jusqu'à la tuyère de jaugeage. En sorte que, si on ne prend pas de précautions, il sort par cette tuyère de l'eau émulsionnée d'air. Dans ces conditions, la mesure du débit d'eau aurait été faussée. Cette difficulté a pu être vaincue en disposant dans la cuve qui précède la tuyère à eau un séparateur, grâce auquel l'air vient se dégager à la partie supérieure de la caisse. Il est évacué au dehors par une petite tuyère de 3 millimètres de diamètre servant à le mesurer, tandis que l'eau coule limpide, sans bulle d'air, par la tuyère principale.

10. Disposition expérimentale. — C'est pendant l'hiver 1895-96 que les expériences ont été faites dans les usines Biétrix et Cie, à Saint-Etienne, où on avait obligeamment mis à ma disposition un générateur de vapeur susceptible de donner, à 15 kilogrammes de pression, beaucoup plus de 1.000 kilogrammes à l'heure. J'ai opéré exprès en hiver afin d'utiliser de l'eau froide à 6° environ et de pouvoir, dès lors, obtenir un échauffement de l'eau atteignant 40 à 50°.

Trois tuyères convergentes ont été successivement soumises aux essais, puis un orifice en mince paroi ; enfin nous avons opéré aussi sur une tuyère convergente-divergente. Les tuyères convergentes sont représentées dans la Pl. II. Elles avaient respectivement un diamètre final de 10,49 millimètres, 15,19 millimètres et 24,20 millimètres, à la température ordinaire de 15°. Quant à l'orifice en mince paroi, représenté aussi dans la Pl. II, son diamètre était de 20,12 millimètres.

Afin de pouvoir faire toutes les lectures utiles, la disposition expérimentale était nécessairement compliquée.

Digitized by Google

On voit l'ensemble de cette disposition en perspective à gauche de la Pl. I, et elle est représentée schématiquement à droite de cette planche.

T est la tuyère en expérience, disposée dans le joint I, entre le tuyau d'arrivée de vapeur N et le tuyau d'évacuation B.

N, tuyau d'arrivée (diamètre intérieur, 60 millimètres).

B, tuyau d'évacuation (diamètre intérieur, 120 millimètres), pourvu d'une plaque *p* formant masque pour le courant de vapeur sortant de la tuyère, de manière à briser le jet.

A, éjecto-condenseur recevant l'eau froide par le tuyau C et l'évacuant par le tuyau D.

S, tuyère à eau de l'éjecto-condenseur, que l'on peut approcher ou éloigner du col de l'éjecto au moyen de la manivelle *g*. Grâce à cette tuyère, il est possible d'étrangler le courant de vapeur dans l'éjecto.

K est un robinet sur le tuyau d'arrivée de vapeur que l'on manœuvre par la poignée 18. Au moyen de ce robinet, on peut faire varier à volonté la pression P en amont de la tuyère, tandis que, par la tuyère S de l'éjecto, on modifie à son gré la pression d'aval *p*.

J est le séparateur d'eau, à force centrifuge. L'eau séparée est évacuée par le robinet 1 et par le tuyau 2.

L est l'appareil servant à mesurer l'humidité restante de la vapeur. La description de cet appareil est donnée dans les *Annales des Mines* (*). Il se compose d'un serpentin 4, chauffé au moyen du fourneau 5 et d'un mélangeur 6, où se réunissent les deux moitiés en lesquelles on a séparé la prise d'échantillon traversant le robinet 3. L'une des moitiés va directement au mélangeur, tandis que l'autre est surchauffée dans le serpentin 4. Le mé-

(*) A. Rateau, *Appareils servant à mesurer l'humidité d'une vapeur* (*Annales des Mines*, avril 1897).

Digitized by Google

lange est évacué par le robinet 7 à pointeau de réglage 9.

La surchauffe dans la moitié du courant qui passe par le serpentin 4 est mesurée par le thermomètre t_3, et la surchauffe du mélange est mesurée par le thermomètre t_2; la pression dans le mélangeur se mesure par le manomètre M_3. Des indications de ces deux thermomètres et du manomètre, on déduit l'humidité de la vapeur.

E est la caisse en tôle servant à séparer l'air de l'eau chaude issue de l'éjecto-condenseur. Cette caisse est coupée vers son milieu par une tôle cintrée 13, sous laquelle les bulles d'air viennent se rassembler. Ces bulles montent à la partie supérieure de la caisse par le tuyau 14 et l'air s'écoule dans l'atmosphère par la petite tuyère J. On mesure la pression sous laquelle son écoulement a lieu par le manomètre à eau 19.

F est la tuyère pour le jaugeage de l'eau, ayant une section finale de 10,99 centimètres carrés à 15°. La charge sous laquelle l'écoulement se faisait était mesurée au moyen du manomètre à eau *hh*. A côté du manomètre à eau, est un thermomètre t_5 permettant de mesurer la température du manomètre et, par suite, de faire la correction de densité de l'eau.

G est un tonneau, de 350 litres de capacité, dans lequel s'écoulait l'eau de la tuyère, et servant au jaugeage de cette tuyère. Ce tonneau est pourvu d'un tube de cristal latéral KK, permettant de lire exactement le niveau de l'eau, et d'un robinet d'évacuation 16. De plus, une tôle 17 cintrée en arc de cercle recevait le jet d'eau pour l'étaler en nappe mince, de telle sorte qu'il tombe dans le tonneau sans rejaillir et sans trop troubler la surface libre du liquide.

M_1, M_2, M_3 sont les manomètres métalliques servant à mesurer les pressions en amont et en aval de la tuyère à vapeur T.

Digitized by Google

cd est le manomètre à mercure dont l'une des branches *c* communique soit avec l'amont de la tuyère, soit avec l'atmosphère par le robinet à trois voies 11, et dont l'autre branche *d* communique soit avec l'aval de la tuyère, soit avec l'atmosphère, par le robinet à trois voies 10. Grâce à ces robinets à trois voies, je pouvais mesurer, suivant les cas, la pression amont, la pression aval, ou encore la différence de l'amont à l'aval. En outre, pour évaluer ces pressions en grandeur absolue, j'avais soin de relever la hauteur barométrique, ainsi du reste que la température ambiante autour du manomètre à mercure.

e, *f* sont les thermomètres permettant de mesurer les températures t_0, t_1 du courant d'eau avant l'éjecto-condenseur et après l'éjecto-condenseur. Ces thermomètres, à mercure, étaient gradués en vingtièmes de degré ; ils ont été préalablement comparés très soigneusement avec un thermomètre étalon Baudin, et j'ai fait aussi la réduction du thermomètre à mercure à l'échelle du thermomètre à air, en sorte que, sauf le déplacement du zéro sur lequel je vais revenir tout à l'heure, les températures sont évaluées à $\frac{1}{20}$ de degré près ou tout au moins à $\frac{1}{10}$ de degré près au plus, avec l'échelle du thermomètre à air.

11. Remarques. — Quelques observations sont nécessaires au sujet de la mesure des pressions et des températures principales.

La lecture des manomètres métalliques, pour la mesure des pressions, ne présentait aucune difficulté. Pour les pressions inférieures à 10 kilogrammes par centimètre carré, j'ai utilisé le manomètre de précision M_1, et, pour les pressions supérieures, c'est le manomètre étalon M_2 qui me servait. Mais c'est le maniement du manomètre

Digitized by Google

à mercure qui a présenté des difficultés. La vapeur, en effet, venait se condenser dans le tube au-dessus de la colonne de mercure et y formait assez souvent des colonnes interrompues par des bulles d'air. Il fallait donc faire la correction due à ces colonnes d'eau en chapelet. En raison de cet inconvénient, les mesures par le manomètre à mercure n'ont pu être toujours aussi exactes que je l'eusse désiré. Cependant, lorsque les colonnes d'eau étaient sans discontinuité, ce qui s'est présenté quelquefois, la correction dans ce cas était certaine.

Les thermomètres *e*, *f* plongeaient dans de petits dés en fer pénétrant à l'intérieur des tuyaux où coulait l'eau. J'avais eu la précaution de mettre du mercure dans ces dés, de manière que la transmission de chaleur aux thermomètres se fasse très rapidement. En fait, l'équilibre des colonnes des thermomètres était atteint en quelques secondes. On peut se demander si la température indiquée par ces thermomètres était bien la température moyenne vraie des courants d'eau. En ce qui concerne le thermomètre *e* placé sur le courant d'eau froide, il ne peut y avoir de doute, parce que la température de ce courant variait peu; mais il aurait pu ne pas en être de même pour le thermomètre *f*, qui plongeait dans un courant nécessairement peu homogène, à la sortie immédiate de l'éjecto, et dont la température, d'ailleurs, variait beaucoup d'une expérience à l'autre. Je pense, toutefois, que les températures relevées sont bien à très peu de chose près les températures moyennes véritables, car, en mettant un thermomètre dans le courant d'eau, à la sortie de la tuyère F, où la température était évidemment devenue uniforme dans toute la masse d'eau, j'ai constaté que ce thermomètre donnait toujours la même indication que le thermomètre *f* à $\frac{1}{10}$ de degré près, tantôt en moins, tantôt en plus ; et cette différence peut être attri-

Digitized by Google

buée au retard dans l'établissement de l'équilibre des températures (après le changement de régime) occasionné par les parois de la caisse en tôle E.

Les thermomètres que j'ai employés étaient faits avec du verre ordinaire. Je les avais soigneusement comparés, ainsi que je viens de le dire, avec un thermomètre de précision de Baudin, de manière à faire les corrections nécessaires et à obtenir, si possible, l'appréciation du vingtième de degré.

Malheureusement, je me suis aperçu, après coup, que j'avais eu bien tort de ne pas me servir, pour la mesure de la température de l'eau chaude, d'un bon thermomètre en verre dur. Je pensais que, jusqu'à 50°, le déplacement du zéro du thermomètre, occasionné par le recuit du verre, aurait été négligeable. Mais il n'en a pas été ainsi.

Mes premiers calculs ayant accusé une différence de plus de 1 p. 100 entre les résultats expérimentaux et les chiffres théoriques, j'ai soupçonné le thermomètre d'avoir été infidèle, et j'ai dû le vérifier de nouveau. J'ai constaté alors que son zéro se déplaçait facilement de 2 à 3 dixièmes de degré, quand on le soumettait à une température de 50°, température qui a été quelquefois dépassée dans mes expériences ; puis il revenait progressivement à sa position initiale. Cette fâcheuse variation du zéro est de nature à fausser jusqu'à plus de 1 p. 100 certains de mes résultats.

Pour réduire au minimum cette influence, j'ai cherché la position moyenne du zéro, lors d'oscillations de température pendant plusieurs jours de suite, et, ayant vu que cette position moyenne différait de 0°,15 de celle que j'avais tout d'abord adoptée, il m'a fallu corriger de cette quantité les résultats que j'avais obtenus tout d'abord. C'est pourquoi le graphique et la conclusion que je donne définitivement ici, quant à la formule du débit, ne sont pas identiques à ce qui se lit sur cette question dans

Digitized by Google

mon Rapport au Congrès de Mécanique appliquée, en 1900, sur les « turbines à vapeur » (*).

12. Tarage de la tuyère à eau. — La détermination du poids total d'eau débité repose sur le coefficient de dépense de la tuyère à eau. Il était donc essentiel de mesurer d'abord ce coefficient de dépense avec la plus grande exactitude possible. C'est ce que j'ai fait à plusieurs reprises. Le diamètre de sortie de la tuyère est de $37^{mm},4$ à 15°.

J'avais fixé deux repères sur le niveau d'eau en verre du tonneau dans lequel s'écoulait l'eau sortant de la tuyère, et j'ai pesé l'eau contenue dans le tonneau entre ces deux repères. A deux mois d'intervalle, la pesée a donné les deux chiffres de $278^{kg},2$ et $278^{kg},05$ à la température de 15° environ ; l'erreur à craindre sur cette mesure ne peut pas atteindre $\frac{1}{2.000}$.

Pendant que la charge H sur la tuyère, évaluée au manomètre à eau *hh*, restait bien constante, je comptais, avec un bon chronomètre à secondes, le temps que mettait le tonneau à se remplir entre les deux repères. Pour donner une idée de l'approximation obtenue, je reproduirai ci-après les mesures de tarage faites les 27 et 30 janvier 1896 (Voir le tableau, à la page 31).

Comme on le voit, ces mesures donnent, d'une expérience à l'autre, des différences de quelques millièmes. Quel que soit le soin que j'aie apporté au maniement du chronomètre, on comprend qu'il m'a été difficile d'éviter des erreurs dépassant un quart de seconde, ce qui, sur une durée de 80 secondes environ, correspond à une erreur relative de 3 millièmes.

(*) Ce rapport a été rédigé rapidement quelques jours avant le Congrès. La partie relative à l'écoulement des vapeurs renferme quelques erreurs de chiffres, qui sont rectifiées ici.

Digitized by Google

Pour les calculs des débits, j'ai adopté le coefficient moyen de 0,9750, peut-être un peu trop élevé. Il est étonnant que le coefficient de dépense ait atteint une valeur aussi voisine de l'unité; mais c'est le résultat de l'expérience; il me faut le prendre tel que je l'ai obtenu.

Je regrette beaucoup de n'avoir pas pu remplacer le tonneau de 350 litres par une cuve beaucoup plus grande, de 3 à 4 mètres cubes de capacité, de manière à compter le débit pendant une dizaine de minutes. J'aurais alors sûrement obtenu l'approximation du millième.

EXEMPLES DE TARAGE DE LA TUYÈRE A EAU.

Diamètre de la tuyère, 37^{mm},4. — *Contenance du tonneau*, 278^{l},5.

	TEMPÉRATURE t_1 de l'eau	HAUTEUR de charge H	TEMPÉRATURE t du manomètre à eau	DURÉE du remplissage du tonneau	DURÉE réduite à H = 478^{mm}	MOYENNES	COEFFICIENT de dépense
		millim.		secondes	secondes	secondes	
27 janvier 1896	29°35	549	22°	79,0	84,6	85,2	0,9711
	25 70	560	17	79,6	86,1		
	31 90	581	17	77,5	85,4		
	22 65	562	18	78,2	84,8		
30 janvier 1896	32	478	19	84,7	84,7	84,75	0,9763
	30	497	23	83,0	84,7		
	29	466	16	86,0	84,9		
	29	451	21	87,2	84,6		

Résultats des expériences.

13. J'ai successivement opéré sur trois tuyères convergentes et sur un orifice en mince paroi. Ces tuyères et cet orifice, qui étaient faits en bronze, sont représentés

Digitized by Google

en vraie grandeur dans la Pl. II. Les tuyères convergentes avaient, ainsi que je l'ai déjà dit, un diamètre de sortie égal, respectivement, à $10^{mm},49$, $15^{mm},19$ et $24^{mm},20$ à 15°; l'orifice en mince paroi avait un diamètre de $20^{mm},12$ à 15°. Ces diamètres ont été relevés avec grande précision, au centième de millimètre, et j'avais d'ailleurs régularisé les orifices en y passant des broches calibrées, de manière à les rendre aussi parfaitement circulaires que possible.

Les résultats des expériences et les calculs sont donnés dans les tableaux annexés à ce mémoire. Les expériences sont numérotées de 1 à 152; onze seulement d'entre elles n'ont pas été transcrites, parce qu'elles m'ont paru entachées d'erreurs accidentelles trop fortes : ce sont les numéros 9, 38, 56, 57, 58, 61, 82, 83, 84, 91 et 92; il conviendrait aussi de supprimer le n° 47.

La première colonne des tableaux est celle des numéros d'ordre; les pressions absolues à l'amont et à l'aval de la tuyère sont données dans les colonnes 2 et 3, et, tout de suite après, dans la colonne 4, on trouve le rapport $\frac{p}{P}$ de ces pressions. Bien entendu, les chiffres inscrits ne sont pas les chiffres bruts relevés sur les instruments, ce sont les chiffres corrigés de manière à avoir les pressions vraies. Ainsi, pour la pression d'amont P, j'ai dû ajouter à la pression lue sur le manomètre une petite quantité, oscillant autour d'un centième de kilogramme, due à la vitesse du courant de vapeur dans le tuyau N qui précède la tuyère. Le manomètre, en effet, ne mesure que la pression statique dans le tuyau; tandis que ce qu'il faut considérer, c'est la pression totale obtenue en ajoutant la pression dynamique du courant à sa pression statique.

La colonne 5 donne la hauteur H de charge sur l'axe de la tuyère à eau, et le chiffre inscrit a été ramené à la température de l'eau coulant par la tuyère.

Digitized by Google

Les colonnes 6 et 7 indiquent les températures t_0 et t_1 de l'eau avant et après l'éjecto-condenseur. Ainsi que je l'ai expliqué précédemment, ce sont les températures ramenées au thermomètre à air ; la différence des chiffres de ces deux colonnes donne l'élévation de température $t_1 - t_0$ de l'eau inscrite dans la colonne 8.

Le débit d'eau en volume s'obtient par la formule :

$$(11) \qquad Q = Ks\sqrt{2gH}, \quad (K = 0{,}975),$$

dans laquelle il faut corriger la section s de la tuyère de la quantité qui correspond à la dilatation du laiton (car la tuyère était en laiton) à la température du courant d'eau chaude. Du débit en volume, on en déduit immédiatement le débit en poids en multipliant par le poids spécifique de l'eau à la température t_1. Ce débit, exprimé en kilogrammes par seconde, est inscrit dans la colonne 9.

La quantité de vapeur écoulée par seconde se calcule maintenant à l'aide de ce débit total d'eau et des températures t_0 et t_1. Appelons λ la chaleur totale de la vapeur depuis 0° centigrade, et C la chaleur spécifique moyenne de l'eau entre les températures t_0 et t_1. Soit X le poids de vapeur s'écoulant par seconde par la tuyère, et Q — X celui de l'eau affluant à l'éjecto-condenseur. L'eau qui résulte de la vapeur condensée est ramenée à la température t_1 ; alors la quantité de chaleur qu'elle cède est égale à $X(\lambda - Ct_1)$ (*), tandis que la quantité d'eau Q — X est échauffée de t_0 à t_1, et absorbe $(Q - X)\,C(t_1 - t_0)$. On a, dès lors, la formule ci-dessous :

$$X(\lambda - Ct_1) = (Q - X)\,C(t_1 - t_0),$$

(*) Pendant la détente de la vapeur dans la tuyère, une certaine quantité de chaleur est transformée en énergie mécanique ; mais cette quantité est immédiatement et intégralement reconstituée par l'anéantissement de la force vive du jet, en sorte que c'est bien l'expression $X(\lambda - Ct_1)$ qu'il faut prendre pour quantité de chaleur cédée par la vapeur.

Digitized by Google

d'où :

$$X = Q \frac{C\vartheta}{\lambda - Ct_0}. \tag{12}$$

La quantité de chaleur λ est donnée par la formule ou par les tables de Regnault ; et la chaleur spécifique C de l'eau résulte de l'expression bien connue :

$$C = 1 + 0{,}4 \frac{t}{10^3} + 0{,}9 \frac{t^2}{10^6}.$$

Les chiffres des débits de vapeur ainsi obtenus, exprimés en grammes par seconde, sont inscrits dans la colonne 10 des tableaux.

En divisant par la section de la tuyère, on a les chiffres de débit par centimètre carré inscrits dans la colonne 11.

Mais une remarque est ici nécessaire. Quelle valeur doit-on prendre pour la section d'une tuyère ? Le diamètre que je donne est mesuré à froid (15°), tandis que, sous l'action du courant de vapeur, la tuyère s'échauffe et son diamètre augmente. Il est impossible de savoir au juste quelle est la température que prend la paroi de la tuyère, car le courant de vapeur ayant, pendant la traversée de cette tuyère, une pression variable, a aussi une température variable ; et, de plus, la paroi est soumise de part et d'autre à des températures différentes. Aussi m'a-t-il semblé illusoire de chercher à évaluer la température vraie de la tuyère dans chaque expérience. J'ai adopté une température moyenne de 120° et basé les calculs sur les diamètres correspondants. C'est là une difficulté de ces recherches sur l'écoulement des vapeurs, comme du reste aussi sur l'écoulement des gaz. Pour bien éliminer cette cause d'erreur, il conviendrait de se servir de métaux ayant un très faible coefficient de dilatation, tels que les nouveaux alliages du fer et du nickel. A l'époque où mes expériences ont été faites, ces alliages

Digitized by Google

n'étaient pas encore connus. Il ne faut pas cependant s'exagérer l'importance de cette cause d'erreur. La température vraie de la tuyère ne pouvait pas s'écarter de plus de 40° environ de la température moyenne adoptée (120°) ; et, pour le bronze, 40° correspondent à une dilatation linéaire de $\frac{1}{1.500}$, en sorte que l'erreur sur la section ne peut pas être supérieure à $\frac{1}{750}$, soit un peu plus de 1 millième.

Enfin, la dernière colonne du tableau donne soit le rapport du débit de vapeur I à la pression d'amont P, quand l'on se trouve dans le cas où P est plus petit que 0,58 P, soit le rapport du débit I au débit maximum I_m, quand le rapport $\frac{p}{P}$ est plus grand que 0,58. Je distingue, d'ailleurs, dans des tableaux différents, ces deux cas, car, en effet, dans le premier cas, le débit ne dépend que de la pression d'amont (il est constant, quel que soit p), tandis que, dans le deuxième cas, il dépend aussi de la pression d'aval.

Examinons maintenant ces résultats et comparons-les à ce que donne la théorie.

14. **Tuyères convergentes.** — Le rapport $\frac{I}{P}$ est peu variable, il oscille autour de la valeur 15. On peut dès lors faire un graphique très clair en portant en ordonnée la valeur de ce rapport. C'est ce qui se trouve fait sur la Pl. II, où j'ai pris pour abscisse le logarithme de la pression d'amont P. Cette représentation graphique est excellente parce que l'origine des coordonnées se trouve très loin en dehors de la feuille, si bien que des petites variations de 1 p. 100 seulement correspondent à une hauteur relativement considérable. Pour bien montrer l'amplification des ordonnées, j'ai marqué, au-dessus et au-dessous de la droite

Digitized by Google

théorique AB, les droites *ab* et *a'b'*, qui s'en écartent de 1 p. 100.

On voit que les points expérimentaux se trouvent en majorité au-dessus de la droite théorique AB. Quelques points seulement s'éloignent de cette droite de plus de 2 p. 100. Si l'on prend, pour chaque tuyère, la moyenne des écarts entre les points expérimentaux et la droite AB, on trouve les résultats ci-après :

Pour la tuyère de $10^{mm},49$ (21 expériences), l'écart est de 11,7 millièmes en plus ;

Pour la tuyère de $15^{mm},19$ (19 expériences), l'écart moyen est de 6,9 millièmes en plus ;

Et pour la tuyère de $24^{mm},20$ (19 expériences), l'écart moyen est de 2,5 millièmes en plus.

Ce sont là des différences assez faibles, qui montrent bien l'accord satisfaisant entre l'expérience et la théorie.

Si l'on trace la courbe moyenne des résultats expérimentaux, on voit qu'elle a bien l'allure de la droite théorique AB, tout en se tenant à quelques millièmes au dessus. Cet écart entre l'expérience et la théorie peut provenir de diverses causes.

D'abord, dans les calculs théoriques, j'ai pris pour équivalent mécanique de la calorie, $E = 425$, ce qui est un peu faible, on le sait bien aujourd'hui. Or E entre à la puissance $\frac{1}{2}$ dans l'expression de la vitesse de la vapeur. Si l'on prend 428 au lieu de 425, les chiffres du débit théorique se trouveront augmentés de 3,5 millièmes et l'écart moyen entre l'expérience et la théorie ne sera plus que de 3,5 millièmes.

Ensuite, nous avons vu que le tarage de la tuyère à eau n'était pas aussi précis que nous l'eussions désiré ; peut-être y a-t-il lieu de craindre là une certaine erreur. Toutefois, je ne crois pas qu'elle puisse dépasser 3 millièmes.

Digitized by Google

Enfin, il y a eu, dans le cours des expériences, un déplacement du zéro pour le thermomètre mesurant la température de l'eau chaude. C'est certainement là la cause de l'erreur la plus importante. J'ai indiqué précédemment qu'après avoir soigneusement examiné les variations du thermomètre, j'ai été conduit à modifier de 0°,15 son premier étalonnage. Néanmoins, il se peut que la position moyenne du zéro pendant les expériences ait différé légèrement de celle que j'ai finalement adoptée. Il suffirait d'une différence de moins de $\frac{1}{10}$ de degré pour occasionner l'écart de 3,5 millièmes qui nous reste.

J'ai marqué sur le graphique les points qui correspondent aux anciennes expériences de Minary et Résal. Ces points sont entourés d'un triangle ; l'un d'eux n'a pu être placé ; il se trouve en dehors des limites de la figure. Comme on le voit, ces expériences ont donné des résultats notablement plus exagérés que les nôtres, ce qui s'explique, ainsi que je l'ai déjà indiqué, par la méthode employée, laquelle ne permettait pas de se débarrasser de l'influence de l'eau entraînée. L'écart atteint jusqu'à 5,2 p. 100, et il est, en moyenne, de 2,5 p. 100.

De même, les expériences de Rosenhain donnent une exagération (tuyère IV) atteignant 3 à 4 p. 100.

Nous verrons bientôt, en analysant les expériences de Hirn sur l'écoulement de l'air, qu'il en a été de même aussi avec ce fluide.

Ainsi, en résumé, il y a accord assez satisfaisant entre l'expérience et la théorie ; mais le débit expérimental semble un peu plus élevé qu'on ne le calcule par la théorie. Faut-il, dans les applications, suivre la formule théorique ou plutôt adopter les coefficients que donnent les expériences précédentes ? Si l'on veut la formule théorique, il faut prendre pour coefficient 15,20 avec E = 425, ou 15,25 avec E = 428 ; et, si l'on veut suivre l'expérience,

Digitized by Google

il faut prendre pour coefficient 15,32 au plus. La formule pratique serait donc :

$$(13) \qquad \frac{I}{P} = 15{,}20 \text{ à } 15{,}32 - 0{,}96 \log P,$$

dans les limites de nos expériences, c'est-à-dire entre $P = 1$ et $P = 12$ kilogrammes par centimètre carré.

J'avais donné, dans mon rapport au Congrès de Mécanique appliquée, pour prémier terme du second membre, 15,42, qui résultait d'un aperçu sommaire des expériences, et, pour second terme, — log P. Depuis, j'ai indiqué, au Congrès International de Glasgow, la valeur 15,20, qui résulte de la formule théorique dans laquelle on fait $E = 425$. Ce sont là les deux limites entre lesquelles on peut faire flotter ce terme. Actuellement, j'estime que la valeur la plus probable est 15,26, avec une erreur relative possible inférieure à 4 millièmes. C'est précisément là le coefficient de la formule de Grashof, qui est déduite du calcul théorique par la première méthode indiquée page 17. Mais, par contre, cette formule de Grashof donne une décroissance trop rapide pour le rapport $\frac{I}{P}$, ainsi qu'on le constate sur la figure de la Pl. II, où la ligne CD correspond à cette formule.

Le coefficient à mettre dans la formule devant log P est compris entre 0,96 et l'unité. J'avais tout d'abord pris l'unité à cause de la simplification qui en résulte. Néanmoins, il vaut mieux prendre 0,96, qui est probablement plus exact, car il est donné par le calcul thermodynamique.

15. Remarques. — L'accord entre l'expérience et la théorie, à moins de 1 p. 100 près, nous permet de conclure qu'il n'y a pas de retard sensible dans la condensation de la vapeur d'eau, contrairement à l'opinion émise quelquefois. En effet, le calcul tient compte de la condensation pendant la détente, et la proportion de vapeur conden-

Digitized by Google

sée, quand la pression est devenue égale à 0,58 P, atteint de 30 à 35 millièmes suivant la valeur de P. Si donc il y avait retard à la condensation, l'expérience révélerait, sur la quantité écoulée, un déficit pouvant atteindre 30 à 35 millièmes. Or, au lieu d'un déficit, nous trouvons plutôt un supplément. On peut donc affirmer que, s'il y a retard à la condensation, ce retard est extrêmement faible, de l'ordre du cent millième de seconde.

D'un autre côté, l'on voit aussi que le coefficient de dépense des tuyères convergentes ayant la forme de celles que j'ai employées est très voisin de l'unité pour $p < 0{,}58$ P, puisque le débit expérimental est trouvé plutôt supérieur au débit théorique. C'est également la conclusion qui résulte des expériences de Hirn sur l'air. Nous allons voir qu'il n'en est plus de même pour $p > 0{,}58$ P.

Enfin, si, renversant la question, l'on suppose *a priori* que le coefficient de dépense est égal à l'unité et que l'on cherche à évaluer le coefficient E de l'équivalent mécanique de la calorie en égalant le débit expérimental au débit théorique, l'on trouve pour E la valeur 431, qui ne diffère que de 7 millièmes de la valeur 428 généralement admise.

16. Expériences avec p plus grand que 0,58 P. — Quand la pression d'aval est plus grande que 0,58 P, l'écoulement ne dépend pas seulement de la pression d'amont P, mais aussi de la pression d'aval p. On peut présenter les résultats sous une forme facile à discuter en prenant le rapport du débit constaté I au débit maximum I_m, qui a lieu quand la pression d'aval est inférieure à 0,58 P. Ce rapport $\frac{I}{I_m}$ ne dépend plus alors, à très peu de chose près, que du rapport $\frac{p}{P}$ entre les pressions. On peut donc por-

Digitized by Google

ter les points sur un graphique et construire la courbe de $\frac{I}{I_m}$ en fonction de $\frac{p}{P}$.

Les tableaux donnent, pour les expériences où p a été supérieur à 0,58 P, dans la colonne 12, le débit théorique I_m calculé par la formule précédemment indiquée :

$$(14) \qquad I_m = P\,(15{,}26 - 0{,}96 \log P),$$

et, dans la colonne 13, le rapport $\frac{I}{I_m}$.

Puis, dans la Pl. III, j'ai porté les points qui résultent de ces expériences, en distinguant, d'ailleurs, ceux qui se rapportent à chacune des trois tuyères convergentes soumises aux essais.

On voit que ces points se rangent assez bien sur une courbe de forme elliptique, comme l'a signalé M. H. Parenty (*). Toutefois, nous constatons des écarts assez notables ; c'est qu'en effet, ainsi que je l'ai fait remarquer, il y avait une assez grande incertitude quelquefois pour la mesure des différences de pressions au manomètre à mercure, quand la colonne d'eau surmontant la colonne de mercure était interrompue par des bulles d'air. La lecture des manomètres métalliques ne donnait aussi qu'une médiocre approximation pour les basses pressions. Aussi est-ce principalement la grande tuyère de $24^{mm},20$ de diamètre qui présente les écarts les plus forts. Les résultats donnés par la petite tuyère sont beaucoup plus réguliers.

Pour comparer les résultats obtenus avec la théorie, j'ai tracé la courbe AB qui résulte du calcul thermodynamique. On obtient aisément cette courbe en prenant les rapports de la fonction $\frac{\varpi V}{x}$, définie à la page 12, à la valeur maximum de cette fonction. Cela revient simplement à prendre

(*) *Annales de Chimie et de Physique*, mai 1896.

Digitized by Google

l'inverse des rapports des nombres de la colonne 8 du tableau de la page 13 au plus petit de ces nombres : 0,70276.

On remarque que la courbe expérimentale se tient, comme elle le doit, un peu au-dessous de la courbe théorique et qu'elle se raccorde avec l'horizontale un peu après le point de raccordement de cette courbe théorique; c'est-à-dire que le débit maximum expérimental n'est pas encore atteint quand la pression d'aval s'est abaissée à 0,58 P ; il faut abaisser encore un peu plus cette pression pour avoir le maximum. Si l'on prend le rapport entre les ordonnées des courbes, expérimentale et théorique, on a le coefficient de dépense des tuyères convergentes. On constate alors que ce coefficient de dépense, d'abord peu différent de 0,94, quand le rapport des pressions est voisin de l'unité, s'accroît peu à peu pour tendre vers la valeur 1.

La courbe expérimentale comme la courbe théorique sont très sensiblement des ellipses. On pourrait donc, d'après cela, exprimer par une formule simple le rapport $\frac{I}{I_m}$ en fonction du rapport $\frac{p}{P}$ des pressions. Mais il me semble inutile d'insister.

Nous verrons que les courbes pour l'air sont aussi très voisines de quadrants d'ellipses.

17. Orifice en mince paroi. — L'orifice en mince paroi ne se comporte pas de la même manière que les tuyères convergentes. Le débit ne devient pas maximum pour p égal ou un peu inférieur à 0,58 P; il croît constamment à mesure que p s'abaisse.

Les chiffres d'expériences sont donnés dans les tableaux soit avec le rapport $\frac{I}{P}$, soit mieux avec le rapport $\frac{I}{I_m}$.

Sur la Pl. III sont aussi traduits graphiquement les résultats relatifs à cet orifice en mince paroi, jusqu'à la

Digitized by Google

valeur de $\frac{p}{P}$ égale à 0,4. On voit que les points se rangent assez régulièrement sur une courbe EF qui va toujours en s'élevant.

Si l'on prend le rapport entre les ordonnées de cette courbe et celles de la courbe théorique AB, on voit que le coefficient de dépense de l'orifice en mince paroi, d'abord égal à 0,61 pour de faibles différences de pressions, va en croissant assez régulièrement jusqu'à la valeur 0,87, qui est atteinte pour des pressions p très faibles. Mais la courbe de ce coefficient de dépense en fonction du rapport $\frac{p}{P}$ n'est pas tout à fait rectiligne, elle présente une légère dépression autour de $\frac{p}{P} = 0,7$. Au contraire, si l'on prend le rapport des ordonnées de la courbe de l'orifice en mince paroi, non pas à celles de la courbe théorique, mais plutôt à celles de la courbe expérimentale CD des tuyères convergentes, on constate que ce rapport croît linéairement. J'ai marqué sur la Pl. III les points qui représentent ce rapport pour certaines valeurs de $\frac{p}{P}$. On voit bien que ces points sont à très peu de chose près sur une droite GH, tangente, naturellement, à la courbe de l'orifice en mince paroi au point a qui est sur l'ordonnée du point où la courbe CD se raccorde avec l'horizontale.

Comparaison avec les résultats des expériences de Hirn sur l'air.

18. Hirn a fait, en 1885, des expériences aussi précises que possible sur l'écoulement de l'air par des tuyères et par des orifices en mince paroi. Il est intéressant de comparer les résultats qu'il a obtenus avec ceux que

Digitized by Google

nous avons relevés nous-mêmes avec la vapeur d'eau.

La méthode de Hirn était directe. Il laissait écouler, dans un récipient où il avait préalablement fait le vide, de l'air venant d'une cloche gazométrique. Par un procédé particulier d'enregistrement, il mesurait les abaissements du gazomètre à des intervalles de temps égaux, ainsi que les pressions d'amont et d'aval. Ses résultats numériques sont donnés dans les *Annales de Chimie et de Physique*, mars 1886. Nous allons les analyser.

Auparavant, remarquons que Hirn n'a pas tenu compte, dans ses calculs, de la légère contraction de l'orifice occasionnée par l'abaissement de température dû à la détente de l'air. Mais il est facile de faire la correction. D'autre part, il me semble avoir à tort desséché l'air après sa sortie du gazomètre et avant son passage à la tuyère. Car, en effet, c'est de l'air sec que débitait la tuyère, tandis que le gazomètre mesurait de l'air humide. Comme le débit des gaz en volume (ramené à la pression et à la température initiales à l'amont) est le même pour tous les gaz, à la même température, et que celui de la vapeur ne peut en différer beaucoup, il eût mieux valu, à mon avis, ne pas dessécher l'air. L'erreur qui en serait résultée n'aurait été que d'une fraction de la proportion de la vapeur d'eau. Quelle est l'erreur à craindre, de ce chef, dans les expériences de Hirn? A 10°, température moyenne des expériences, la tension de la vapeur d'eau est de $0^{kg},0125$ par centimètre carré, et son poids spécifique est égal à 0,00915; l'erreur des résultats due à cette cause serait donc de 2 p. 100 environ en plus.

Les mesures de Hirn ont été faites sur deux tuyères convergentes — l'une de 9° d'ouverture, l'autre de 13° — sur une tuyère conico-cylindrique et sur deux orifices en mince paroi. En ce qui concerne les tuyères, ces expériences ont bien montré que le débit devient maximum quand la pression d'aval s'abaisse légèrement au-dessous

Digitized by Google

du chiffre théorique pour les gaz permanents (0,526P). Si l'on rapporte le débit à l'unité de section de l'orifice de sortie, on a les chiffres ci-après :

19^{lit},80 par centimètre carré et par seconde pour la tuyère convergente de 9°, à la température initiale de 15°,75 ;

19^{lit},77 par centimètre carré et par seconde pour la tuyère convergente de 13° à la température de 8° ;

18^{lit},85 par centimètre carré et par seconde pour la tuyère conico-cylindrique, à la température de 6°,5 ;

Tandis que le débit théorique maximum, qui se calcule par la formule $Q = 1,164 \sqrt{T}$ où T est la température absolue à l'amont et où Q est exprimé en litres par centimètre carré et par seconde, était respectivement de 19^{lit},77, 19,50 et 19,47. On voit donc que, pour la tuyère conico-cylindrique, le débit expérimental est inférieur au débit théorique, ce qui doit être à cause des pertes par frottements dans la partie cylindrique. Mais, pour les tuyères convergentes, le débit mesuré est supérieur au débit théorique, de 0,75 p. 100 en moyenne. Nous trouvons là le même fait que nous avons déjà rencontré pour la vapeur d'eau. Remarquons, toutefois, que cette exagération du débit mesuré peut provenir, ainsi que je l'ai expliqué précédemment, de ce que Hirn a desséché l'air.

Sur la Pl. IV, j'ai porté les points expérimentaux en prenant pour abscisse le rapport $\frac{p}{P}$ des pressions et pour ordonnée le rapport $\frac{Q}{Q_m}$ du débit observé au débit maximum. J'ai marqué aussi quelques points résultant du calcul théorique.

On voit que, avec la tuyère convergente de 13° et avec la tuyère conico-cylindrique, la courbe expérimentale AB suit très bien la courbe théorique, sauf dans la partie voisine du maximum ; mais, pour la tuyère con-

Digitized by Google

vergente de 9°, la courbe expérimentale CD s'écarte beaucoup de la courbe théorique, particulièrement du côté de l'origine. Il semble qu'il y a eu dans la série de mesures relative à cette tuyère une cause d'erreur systématique.

Les résultats accusés par les deux orifices en mince paroi se laissent assez bien grouper autour de la courbe EF tracée sur la Pl. IV. Si on prend le rapport entre les ordonnées de cette courbe et celles de la courbe AB relative aux tuyères convergentes, ainsi que nous l'avons fait pour la vapeur d'eau, on trouve des chiffres qui croissent linéairement, c'est-à-dire que les points qui représentent ces rapports et qui sont marqués sur la figure se rangent très exactement sur une ligne droite GH tangente à la courbe EF de l'orifice en mince paroi. L'ordonnée à l'origine de cette droite est de 0,629, tandis que Hirn a trouvé, par l'expérience directe, que le coefficient de dépense des orifices en mince paroi pour de faibles chutes de pressions était de 0,633.

Si maintenant l'on compare les courbes ainsi tracées pour l'écoulement de l'air à celles que j'ai obtenues pour l'écoulement de la vapeur d'eau, on constate que ces courbes sont tout à fait analogues, et elles se superposent presque. Il y a toutefois cette différence que le maximum des courbes a lieu théoriquement, avec l'air, pour $\frac{p}{P}=0,526$, tandis que, avec la vapeur d'eau, il se présente pour $\frac{p}{P}=0,58$; on remarque aussi que la droite qui représente le rapport du coefficient de dépense des orifices en mince paroi à celui des tuyères convergentes se tient, pour la vapeur, à 2 p. 100 au-dessus de la droite correspondante pour l'air. Cette différence est-elle due aux erreurs d'expériences, ou tient-elle à la différence des natures des fluides? Il ne semble pas actuellement possible de répondre à cette question.

Digitized by Google

1. — 30 *janvier* 1896 — *Température extérieure* 16° — *Pression barométrique* 736 *mm.* = 0,997 *kg.*
Tuyère convergente B — *Diamètre* 15,19 *mm.* — *Section à* 120° : 1,819 *centimètre carré.*

NUMÉROS	PRESSIONS ABSOLUES Amont P kgs/cm²	PRESSIONS ABSOLUES Aval p kgs/cm²	RAPPORT $\frac{p}{P}$	HAUTEUR H millimètres	TEMPÉRATURES Entrée t_0	TEMPÉRATURES Sortie t_1	ÉLÉVATION de température $t_1 - t_0$	DÉBIT TOTAL d'eau kgs/sec	DÉBIT DE VAPEUR Total gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Par centim. carré I gr/sec	RAPPORT $\frac{I}{P}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	9,26	0,144	0,0155	553	5,40	50,50	45,10	3,491	240,97	132,48	14,311
2	8,53	0,157	0,0184	589	5,50	46,05	40,55	3,609	224,37	123,36	14,467
3	8,43	0,144	0,0171	582	5,40	45,65	40,25	3,599	222,05	122,08	14,487
4	7,49	0,144	0,0192	590	5,50	41,05	35,55	3,620	197,72	108,69	14,520
5	6,68	0,144	0,0216	591,5	5,50	37,40	31,90	3,629	178,20	97,97	14,678
6	5,52	0,103	0,0187	584,5	6,82	33,35	26,53	3,611	148,27	81,51	14,786
7	4,48	0,0895	0,0200	575,5	6,72	28,60	21,88	3,588	121,50	67,01	14,902
8	3,64	0,103	0,0283	579	6,07	23,65	17,58	3,604	98,61	54,22	14,890
10	4,14	0,166	0,2816	473	5,67	27,65	21,98	3,253	111,02	61,03	14,737
11	4,10	1,945	0,4744	426	5,59	28,50	22,91	3,087	109,79	60,19	14,717

Digitized by Google

3. — *4 février* 1896 — *Température extérieure* 16° — *Pression barométrique* 734 *mm.* = 0,996 *kg.*
Tuyère convergente C — *Diamètre* 24,20 *mm.* — *Section à* 120° : 4,6176 *centimètres carrés.*

NUMÉROS	PRESSIONS ABSOLUES		RAPPORT	HAUTEUR	TEMPÉRATURES		ÉLÉVATION	DÉBIT TOTAL	DÉBIT DE VAPEUR		RAPPORT
	Amont P kgs/cm²	Aval p kgs/cm²	$\frac{p}{P}$	H millimètres	Entrée t_0	Sortie t_1	de température $t_1 - t_0$	d'eau kgs/sec	Total gr/sec	Par centim. carré I gr/sec	$\frac{I}{P}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
25	2,44	0,154	0,0631	564	11,25	41,31	30,06	3,538	168,05	36,395	14,92
26	1,99	0,133	0,0668	560	10,85	35,80	24,95	3,532	139,59	30,229	15,19
27	1,53	0,108	0,0706	564	10,65	29,73	19,08	3,551	107,69	23,319	15.24
28	1,15	0,127	0,1103	551	10,40	24,78	14,38	3,514	80,63	17,461	15,19
29	1,22	0,122	0,1000	578	6,90	22,10	15,20	3,601	86,76	18,788	15,40
30	1,80	0,198	0,1100	572	6,77	29,10	22,33	3,577	125,86	27,256	15,14
31	2,93	0,171	0,0584	574,5	6,57	42,38	35,81	3,570	199,99	43,311	14,78
32	3,57	0,184	0,0516	550,5	6,47	50,98	44,51	3,482	241,64	52,352	14,66
33	4,03	0,235	0,0547	570,5	6,12	55,02	48,90	3,537	269,21	58,298	14,46
34	1,00	0,355	0,3550	558,5	6,07	18,52	12,55	3,542	70,20	15,206	15,21
35	3,05	1,462	0,4800	391	5,70	50,52	44,82	2,935	205,86	44,579	14,61
36	2,97	0,964	0,3223	452	5,77	46,62	40,85	3,160	202,05	43,757	14,73
37	2,95	1,685	0,5710	364	5,62	50,21	44,59	2,833	198,77	43,047	14,59

Digitized by Google

15. — 20 *février* 1896 — *Température extérieure* 19° — *Pression barométrique* 732 *mm.* = 0,991 *kg.*
Tuyère convergente A — *Diamètre* 10,49 *mm.* — *Section à* 120° : 0,8686 *centimètre carré.*

NUMÉROS	PRESSIONS ABSOLUES Amont P kgs/cm²	PRESSIONS ABSOLUES Aval p kgs/cm²	RAPPORT $\frac{p}{P}$	HAUTEUR H millimètres	TEMPÉRATURES Entrée t_0	TEMPÉRATURES Sortie t_1	ÉLÉVATION de température $t_1 - t_0$	DÉBIT TOTAL d'eau kgs/sec	DÉBIT DE VAPEUR Total gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Par centim. carré I gr/sec	RAPPORT $\frac{I}{P}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
79	9,16	0,231	0,0252	583	7,77	28,61	20,84	3,612	115,57	133,34	14,522
80	8,42	0,201	0,0239	581,7	8,21	27,43	19,22	3,608	106,78	122,73	14,583
81	7,76	0,191	0,0246	572,6	8,46	26,35	17,89	3,581	98,74	113,68	14,653
85	10,74	0,151	0,0140	599	6,42	30,37	23,95	3,659	133,82	154,06	14,339
86	10,41	0,151	0,0145	594	6,49	29,88	23,39	3,644	130,25	149,96	14,401
87	9,98	0,151	0,0151	589,5	6,71	29,20	22,49	3,631	124,93	143,83	14,407
88	9,48	0,141	0,0149	586,5	6,82	28,31	21,49	3,622	119,23	137,27	14,475
89	8,99	0,141	0,0157	583,3	6,71	27,26	20,55	3,613	113,83	131,05	14,572
90	8,46	0,131	0,0155	567	6,62	26,21	19,59	3,563	107,11	123,32	14,572
93	11,34	0,191	0,0168	565,5	6,19	31,81	25,62	3,554	138,84	159,84	14,098
94	11,42	0,191	0,0167	580,5	6,26	32,05	25,79	3,600	141,58	163,00	14,268
95	11,44	0,191	0,0167	580,5	6,29	32,25	25,96	3,600	142,51	164,07	14,338
96	11,14	0,151	0,0136	574,5	6,27	31,56	25,29	3,582	138,21	159,12	14,339
97	10,46	0,151	0,0144	576,5	6,27	30,43	24,16	3,589	132,46	152,50	14,574
98	11,84	0,151	0,0128	570	6,24	33,30	27,06	3,566	147,04	169,29	14,294
99	11,54	0,151	0,0131	565	6,12	33,05	26,93	3,551	145,75	167,81	14,536

Digitized by Google

6. — 10 *mars* 1896 — *Température extérieure* 20° — *Pression barométrique* 732 *mm.* = 0,992 *kg.*
Tuyère convergente A — *Diamètre* 10,49 *mm.* — *Section à* 120° : 0,8686 *centimètre carré.*

NUMÉROS	PRESSIONS ABSOLUES		RAPPORT	HAUTEUR	TEMPÉRATURES		ÉLÉVATION	DÉBIT TOTAL	DÉBIT DE VAPEUR		RAPPORT
	Amont P kgs/cm²	Aval p kgs/cm²	$\frac{p}{P}$	H millimètres	Entrée t_0	Sortie t_1	de température $t_1 - t_0$	d'eau kgs/sec	Total gr/sec	Par centim. carré I gr/sec	$\frac{I}{P}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
100	10,74	4,89	0,4553	352,5	5,92	37,00	31,08	2,801	132,86	152,96	14,236
101	10.54	5,24	0,4767	353,5	5,97	36,55	30,58	2,805	130,98	150,80	14,30
102	10.49	5,49	0,5234	353,5	5,97	36,50	30,53	2,805	130,78	150,56	14,35
103	10,46	5,74	0,5488	352,5	5,97	36,45	30,48	2,801	130,39	150,12	14,34
104	10,43	5,99	0,5744	351,5	5,97	36,35	30,38	2,797	129,79	149,43	14,32

4. — 5 *février* 1896 — *Température extérieure* 17° — *Pression barométrique* 735 *mm.* = 0,996 *kg.*
Tuyère convergente C — *Diamètre* 24,20 *mm.* — *Section à* 120° : 4,6176 *centimètres carrés.*

NUMÉROS	PRESSIONS ABSOLUES		RAPPORT	HAUTEUR	TEMPÉRATURE		ÉLÉVATION	DÉBIT TOTAL	DÉBIT DE VAPEUR		RAPPORT
	Amont P kgs/cm²	Aval p kgs/cm²	$\frac{p}{P}$	H millimètres	Entrée t_0	Sortie t_1	de température $t_1 - t_0$	d'eau kgs/sec	Total gr/sec	Par centim. carré I gr/sec	$\frac{I}{P}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
55	1,19	0,644	0,5412	522	6,37	21,70	15,33	3,423	82,48	17,985	15,11
62	1,58	0,646	0,4089	532	5,47	25,62	20,15	3,452	109,47	23,784	15,03
63	1.59	0.713	0,4485	519	5,47	25,97	20,50	3,409	109,48	23,887	15,03
64	1,60	0,796	0,4975	505	5,47	26,55	21,08	3,362	111,65	24,191	15,13
65	1,63	0,887	0,5442	490	5,49	26,96	21,47	3,311	111,52	24,293	14,89
67	1,64	0,717	0,4372	503	5,47	27,08	21,61	3,355	114,18	24,788	15,10

Digitized by Google

7. — 12 *mars* 1896 — *Température extérieure* 21° : *Pression barométrique* 729 *mm.* = 0,988 *kg.*
Orifice en mince paroi D — *Diamètre* 20,12 *mm.* — *Section à* 120° : 3,1918 *centimètres carrés.*

NUMÉROS	PRESSIONS ABSOLUES Amont P kgs/cm²	PRESSIONS ABSOLUES Aval p kgs/cm²	RAPPORT $\frac{p}{P}$	HAUTEUR H millimètres	TEMPÉRATURES Entrée t_0	TEMPÉRATURES Sortie t_1	ÉLÉVATION de température $t_1 - t_0$	DÉBIT TOTAL d'eau kgs/sec	DÉBIT DE VAPEUR Total gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Par centim. carré I gr/sec	RAPPORT $\frac{I}{P}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
117	4,04	1,820	0,4505	577	6,22	35,95	29,73	3,585	165,63	51,924	12,85
118	4,02	1,534	0,3816	548	6,12	36,35	30,23	3,493	164,20	51,444	12,80
119	3,96	1,236	0,3121	489	6,04	37,55	31,51	3,298	161,63	50,640	12,79
120	3,86	0,993	0,2573	445	6,02	38,27	32,25	3,145	157,83	49,448	12,82
121	2,41	0,298	0,1237	571,3	6,12	24,09	17,97	3,578	100,77	31,573	13,10
122	2,54	0,728	0,2866	506,5	6,12	25,87	19,05	3,368	104,12	32,626	12,85
123	2,57	0,958	0,3728	482,5	5,97	26,35	20,38	3,287	104,84	32,846	12,78
124	2,61	1,148	0,4398	460,6	6,12	26,80	20,68	3,211	103,94	32,566	12,48
125	2,27	1,168	0,5145	464,2	6,12	23,45	17,33	3,226	87,69	27,480	12,11
126	2,36	1,378	0,5839	453,2	6,12	23,45	17,33	3,187	86,58	27,130	11,50

Digitized by Google

8. — 13 *mars* 1896 — *Température extérieure* 23° — *Pression barométrique* 727 *mm.* = 0,985 *kg.*
Orifice en mince paroi D — *Diamètre* 20,12 *mm.* — *Section à* 120° : 3,1918 *centimètres carrés.*

NUMÉROS	PRESSIONS ABSOLUES Amont P kgs/cm²	PRESSIONS ABSOLUES Aval p kgs/cm²	RAPPORT $\frac{p}{P}$	HAUTEUR H millimètres	TEMPÉRATURES Entrée t_0	TEMPÉRATURES Sortie t_1	ÉLÉVATION de température $t_1 - t_0$	DÉBIT TOTAL d'eau kgs/sec	DÉBIT DE VAPEUR Total gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Par centim. carré I gr/sec	RAPPORT $\frac{I}{P}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
129	4,135	1,355	0,3285	528	5,87	40,03	34,16	3,083	163,65	51,275	12,40
130	4,135	1,635	0,3955	396	5,82	41,08	35,26	2,965	162,42	50,910	12,31
131	3,855	1,885	0,4920	387	5,84	37,68	31,84	2,934	145,38	45,551	11,88
132	3,805	2,045	0,5375	377	5,87	37,32	31,45	2,897	141,75	44,424	11,68
133	2,085	1,595	0,5344	421	5,82	29,25	23,43	3,068	112,27	35,182	11,73

9. — 17 *mars* 1896 — *Température extérieure* 16° — *Pression barométrique* 730 *mm.* = 0,989 *kg.*
Tuyère convergente* B — *Diamètre* 15,19 *mm.* — *Section à* 120° : 1,819 *centimètre carré.

NUMÉROS	PRESSIONS ABSOLUES Amont P kgs/cm²	PRESSIONS ABSOLUES Aval p kgs/cm²	RAPPORT $\frac{p}{P}$	HAUTEUR H millimètres	TEMPÉRATURES Entrée t_0	TEMPÉRATURES Sortie t_1	ÉLÉVATION de température $t_1 - t_0$	DÉBIT TOTAL d'eau kgs/sec	DÉBIT DE VAPEUR Total gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Par centim. carré I gr/sec	RAPPORT $\frac{I}{P}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
144	5,266	0,369	0,0701	585,2	6,12	30,97	24,85	3,616	139,03	76,523	14,52
145	3,893	0,369	0,0948	585	6,12	24,50	18,38	3,621	103,50	56,896	14,61
146	2,912	0,229	0,0787	571,5	6,17	20,35	14,18	3,582	79,34	43,690	15,00
147	5,395	0,249	0,0462	593,5	5,97	31,13	25,16	3,642	141,67	77,881	14,44
148	4,444	0,209	0,0470	583	5,97	26,95	20,98	3,613	117,58	64,640	14,55
149	3,423	0,169	0,0494	578,2	5,97	22,30	16,33	3,601	91,52	50,371	14,72
150	5,495	0,179	0,0326	579,7	5,90	31,97	26,07	3,598	144,98	79,698	14,50
151	4,474	0,169	0,0378	569	5,92	27,34	21,42	3,569	118,57	65,176	14,56

Digitized by Google

1. — 30 *janvier* 1896 — *Température extérieure* 16° — *Pression barométrique* 736 *mm.* = 0,997 *kg.*
Tuyère convergente B — *Diamètre* 15,19 *mm.* — *Section à* 120° : 1,819 *centimètre carré.*

NUMÉROS	PRESSIONS ABSOLUES Amont P kgs/cm²	PRESSIONS ABSOLUES Aval p kgs/cm²	RAPPORT $\frac{p}{P}$	HAUTEUR H millimètres	TEMPÉRATURES Entrée t_0	TEMPÉRATURES Sortie t_1	ÉLÉVATION de température $t_1 - t_0$	DÉBIT TOTAL d'eau kgs/sec	DÉBIT DE VAPEUR Total gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Par centim. carré I gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Théorique maximum I_m gr/sec	RAPPORT $\frac{I}{I_m}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
12	3,84	2,933	0,764	451	5,60	23,50	17,90	3,179	88,44	48,620	56,43	0,816
13	3,92	3,492	0,891	482	5,60	18,70	13,10	3,290	66,94	36,75	57,57	0,638
14	4,04	3,716	0,920	220	5,41	22,85	17,45	2,222	60,29	33,09	59,29	0,558
15	5,00	4,826	0,965	131	5,07	23,10	18,03	1,714	47,76	26,26	72,95	0,360

2. — 31 *janvier* 1896 — *Température extérieure* 17° — *Pression barométrique* 735 *mm.* = 0,996 *kg.*
Tuyère convergente B — *Diamètre* 15,19 *mm.* — *Section à* 120° : 1,819 *centimètre carré.*

NUMÉROS	PRESSIONS ABSOLUES Amont P kgs/cm²	PRESSIONS ABSOLUES Aval p kgs/cm²	RAPPORT $\frac{p}{P}$	HAUTEUR H millimètres	TEMPÉRATURES Entrée t_0	TEMPÉRATURES Sortie t_1	ÉLÉVATION de température $t_1 - t_0$	DÉBIT TOTAL d'eau kgs/sec	DÉBIT DE VAPEUR Total gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Par centim. carré I gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Théorique maximum I_m gr/sec	RAPPORT $\frac{I}{I_m}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
16	4,23	3,603	0,852	458,5	5,60	22,10	16,50	3,207	82,09	45,12	61,99	0,728
17	5,42	5,164	0,953	498	5,72	17,72	12,00	3,345	62,01	34,08	78,89	0,432
18	5,52	4,581	0,830	399	5,60	29,98	24,38	2,986	112,46	61,82	80,30	0,770
19	5,75	5,113	0,892	413	5,62	26,50	20,88	3,041	98,00	53,87	83,50	0,645
20	5,56	5,132	0,923	443,5	5,62	22,30	16,68	3,154	81,23	44,66	80,87	0,552
21	6,24	5,763	0,924	415,5	5,57	24,78	19,21	3,051	90,32	49,65	90,45	0,549
22	6,43	6,236	0,970	485	5,62	17,33	11,71	3,301	59,42	32,72	93,11	0,351
23	6,46	6,296	0,975	120,4	5,17	27,00	21,83	1,641	55,12	30,30	93,53	0,324
24	6,05	5,496	0,908	390,5	5,54	26,45	20,91	2,954	95,23	52,35	87,79	0,597

Digitized by Google

3. — *4 février* 1896 — *Température extérieure* 16° — *Pression barométrique* 734 *mm.* = 0,995 *kg.*
Tuyère convergente C — *Diamètre* 24,20 *mm.* — *Section à* 120° : 4,6176 *centimètres carrés.*

NUMÉROS	PRESSIONS ABSOLUES Amont P kgs/cm²	PRESSIONS ABSOLUES Aval p kgs/cm²	RAPPORT $\frac{p}{P}$	HAUTEUR H millimètres	TEMPÉRATURES Entrée t_0	TEMPÉRATURES Sortie t_1	ÉLÉVATION de température $t_1 - t_0$	DÉBIT TOTAL d'eau kgs/sec	DÉBIT DE VAPEUR Total gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Par centim. carré I gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Théorique maximum I_m gr/sec	RAPPORT $\frac{I}{I_m}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
39	2,72	1,943	0,744	373	5,52	41,97	36,45	2,876	162,97	35,51	40,33	0,881
40	3,23	2,025	0,853	348	5,47	41,77	36,50	2,777	157,20	34,04	47,67	0,714
41	3,02	2,754	0,901	387,5	5,57	32,11	26,54	2,941	121,83	26,38	45,65	0,591
42	2,85	2,731	0,948	437,5	5,57	23,00	17,43	3,132	85,26	18,46	42,20	0,437
43	4,05	2,702	0,951	370,5	5,52	31,76	26,24	2,876	117,22	25,38	59,43	0,427
44	5,05	4,958	0,982	414,7	5,52	23,79	18,27	3,049	86,16	18,66	73,66	0,253
45	5,50	5,458	0,992	453	5,57	17,82	12,25	3,190	60,33	13,06	80,02	0,159
46	2,95	5,850	0,966	478	5,32	19,21	13,89	3,276	70,98	15,37	43,57	0,353
48	4,03	3,964	0,984	472	5,32	18,03	13,34	3,252	67,38	14,59	59,15	0,247
49	4,75	4,656	0,980	414,5	5,32	25,18	19,86	3,047	93,67	20,29	69,39	0,292
50	4,96	4,922	0,992	151	5,07	24,14	19,07	1,830	53,94	11,68	72,38	0,161
51	5,02	4,987	0,993	104	4,92	26,35	21,43	1,526	50,53	10,94	72,23	0,149
52	1,95	1,717	0,881	440	5,32	23,40	18,08	3,141	89,15	19,31	29,21	0,661
53	1,58	1,236	0,782	457	5,32	23,55	18,23	3,201	91,90	19,90	23,78	0,837
54	1,32	1,138	0,862	484,3	5,32	17,57	12,25	3,308	64,00	13,86	19,96	0,694

Digitized by Google

4. — 5 *février* 1896 — *Température extérieure* 17° — *Pression barométrique* 735 *mm.* = 0,996 *kg.*
Tuyère convergente C — *Diamètre* 24,20 *mm.* — *Section à* 120° : 4,6176 *centimètres carrés.*

NUMÉROS	PRESSIONS ABSOLUES Amont P kgs/cm²	PRESSIONS ABSOLUES Aval p kgs/cm²	RAPPORT $\frac{p}{P}$	HAUTEUR H millimètres	TEMPÉRATURES Entrée t_0	TEMPÉRATURES Sortie t_1	ÉLÉVATION de température $t_1 - t_0$	DÉBIT TOTAL d'eau kgs/sec	DÉBIT DE VAPEUR Total gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Par centim. carré I gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Théorique maximum I_m gr/sec	RAPPORT $\frac{I}{I_m}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
56	1,21	0,787	0,650	521,5	5,42	20,50	15,08	3,416	81,46	17,64	18,34	0,961
57	1,24	0,871	0,702	513,5	5,42	20,30	14,88	3,395	79,68	17,25	18,78	0,918
58	1,07	0,750	0,701	521,5	5,47	18,62	13,15	3,423	71,29	15,44	16,29	0,948
59	1,18	0,937	0,794	513,5	5,47	17,97	12,50	3,396	67,16	14,54	17,90	0,812
60	1,16	1,003	0,865	517,0	5,47	15,83	10,36	3,409	55,86	12,10	17,61	0,687
66	1,64	0,966	0,590	477	5,47	27,39	21,92	3,267	112,72	24,42	24,66	0,991
68	1,68	1,077	0,641	462	5,42	27,59	22,17	3,215	112,20	24,30	25,24	0,963
69	1,50	1,036	0,687	466	5,42	24,68	19,26	3,261	98,11	21,25	22,60	0,940
70	1,72	1,366	0,794	442	5,42	25,08	19,66	3,146	97,22	21,07	25,83	0,816
71	2,16	1,924	0,891	421	5,42	24,78	19,36	3,072	92,78	20,09	32,25	0,623
72	5,94	5,689	0,958	305,5	5,02	45,87	40,85	2,590	163,19	35,34	86,24	0,410
73	6,05	5,855	0,968	335	5,02	39,88	34,86	2,727	146,54	31,64	87,81	0,360
74	6,14	5,995	0,977	357,3	5,02	34,25	29,23	2,823	127,11	27,53	89,06	0,310
75	6,26	6,157	0,983	389,7	5,20	28,90	23,70	2,953	106,77	23,34	90,74	0,257
76	6,40	6,330	0,989	432	5,22	23,69	18,47	3,112	88,47	19,16	92,71	0,207
77	6,58	6,535	0,993	481	5,22	19,36	14,14	3,287	71,48	15,48	95,24	0,162
78	6,67	6,639	0,995	496,5	5,20	16,83	11,63	3,340	59,71	12,93	96,51	0,134

Digitized by Google

6. — 10 *mars* 1896 — *Température extérieure* 20° — *Pression barométrique* 732 *mm.* = 0,992 *kg.*
Tuyère convergente A — *Diamètre* 10,49 *mm.* — *Section à* 120° : 0,8686 *centimètre carré.*

NUMÉROS	PRESSIONS ABSOLUES Amont P kgs/cm²	PRESSIONS ABSOLUES Aval p kgs/cm²	RAPPORT $\frac{p}{P}$	HAUTEUR H millimètres	TEMPÉRATURES Entrée t_0	TEMPÉRATURES Sortie t_1	ÉLÉVATION de température $t_1 - t_0$	DÉBIT TOTAL d'eau kgs/sec	DÉBIT DE VAPEUR Total gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Par centim. carré I gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Théorique maximum I_m gr/sec	RAPPORT $\frac{I}{I_m}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
105	10,31	6,10	0,600	344,3	5,90	36,00	30,10	2,769	127,30	146,54	147,30	0,995
106	10,29	6,44	0,626	344,3	5,90	35,75	29,85	2,765	126,07	145,14	147,02	0,987
107	10,21	6,69	0,655	346,3	5,88	34,75	28,87	2,778	122,50	141,03	145,91	0,966
108	10,17	6,94	0,683	349	5,88	34,05	28,17	2,789	120,05	138,21	145,37	0,951
109	10,14	7,19	0,710	356	5,88	33,05	27,17	2,818	117,00	134,69	144,90	0,929
110	10,09	7,44	0,738	364	5,88	31,76	25,88	2,851	112,73	129,78	144,25	0,899
111	10,19	7,74	0,760	368	5,88	31,22	25,34	2,867	110,97	127,76	145,65	0,877
112	10,44	7,99	0,766	366	5,88	31,67	25,79	2,859	112,56	129,60	149,10	0,869
113	10,52	8,44	0,803	380,7	5,88	29,79	23,91	2,917	106,47	122,58	150,21	0,816
114	10,56	8,94	0,846	403,5	5,88	27,25	21,37	3,005	98,01	112,84	150,76	0,754
115	10,67	9,49	0,890	428	5,88	23,99	18,11	3,097	85,58	98,51	152,29	0,647
116	10,78	9,92	0,921	439	5,88	21,70	15,82	3,138	75,72	87,16	153,81	0,567

Digitized by Google

7. — 12 *mars* 1896 — *Température extérieure* 21° — *Pression barométrique* 729 *mm.* = 0,988 *kg.*
Orifice en mince paroi D — *Diamètre* 20,12 *mm.* — *Section à* 120° : 3,1918 *centimètres carrés.*

NUMÉROS	PRESSIONS ABSOLUES		RAPPORT	HAUTEUR	TEMPÉRATURES		ÉLÉVATION de température	DÉBIT TOTAL d'eau	DÉBIT DE VAPEUR			RAPPORT
	Amont P kgs/cm²	Aval p kgs/cm²	$\frac{p}{P}$	H millimètres	Entrée t_0	Sortie t_1	$t_1 - t_0$	kgs/sec	Total gr/sec	Par centim. carré I gr/sec	Théorique maximum I_m gr/sec	$\frac{I}{I_m}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
117	4,04	0,156	0,0390	577	6,22	35,95	29,73	3,585	165,72	51,92	59,29	0,876
118	4,02	0,441	0,1096	548	6,12	36,35	30,23	3,493	164,19	51,44	59,01	0,872
119	3,96	0,738	0,1863	489	6,04	37,55	31,51	3,298	161,64	50,64	58,15	0,871
120	3,86	0,993	0,2573	445	6,02	38,27	32,25	3,145	157,82	49,45	56,72	0,872
121	2,41	0,298	0,1237	571,3	6,12	24,09	17,97	3,578	100,77	31,56	35,86	0,884
122	2,54	0,728	0,2866	506,5	6,12	25,87	19,05	3,368	104,12	32,63	37,73	0,865
123	2,57	0,958	0,3728	482,5	5,97	26,35	20,38	3,287	104,84	32,75	38,16	0,858
124	2,61	1,148	0,4398	460,6	6,12	26,80	20,68	3,211	103,93	32,57	38,74	0,841
125	2,27	1,168	0,5145	464,2	6,12	23,45	17,33	3,226	87,69	27,44	33,84	0,811
126	2,36	1,378	0,5839	453,2	6,12	23,45	17,33	3,187	86,58	27,13	35,13	0,772
127	2,51	1,668	0,665	439,2	6,12	23,55	17,43	3,145	85,64	26,84	37,30	0,720
128	2,24	1,738	0,776	459,8	6,12	19,22	13,10	3,218	66,03	20,69	33,40	0,619

Digitized by Google

8. — 13 *mars* 1896 — *Température extérieure* 23° — *Pression barométrique* 727 *mm.* = 0,985 *kg.*
Orifice en mince paroi D — *Diamètre* 20,12 *mm.* — *Section à* 120° : 3,1918 *centimètres carrés.*

NUMÉROS	PRESSIONS ABSOLUES Amont kgs/cm²	PRESSIONS ABSOLUES Aval p kgs/cm²	RAPPORT $\frac{p}{P}$	HAUTEUR H millimètres	TEMPÉRATURES Entrée t_0	TEMPÉRATURES Sortie t_1	ÉLÉVATION de température $t_1 - t_0$	DÉBIT TOTAL d'eau kgs/sec	DÉBIT DE VAPEUR Total gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Par centim. carré I gr/sec	DÉBIT DE VAPEUR Théorique maximum I_m gr/sec	RAPPORT $\frac{I}{I_m}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
129	4,135	1,355	0,329	428	5,87	40,03	34,16	3,083	163,54	51,27	60,63	0,846
130	4,135	1,635	0,396	396	5,82	41,08	35,26	2,965	162,43	50,91	60,63	0,840
131	3,835	1,885	0,492	397	5,84	37,68	31,84	2,934	145,38	45,55	56,40	0,808
132	3,805	2,045	0,538	377	5,87	37,32	31,45	2,897	141,75	44,42	55,97	0,794
133	2,985	1,595	0,534	421	5,82	29,25	23,43	3,068	112,27	35,18	44,15	0,797
134	3,035	1,805	0,595	409,6	5,82	29,10	23,28	3,026	109,92	34,45	44,87	0,768
135	3,185	2,045	0,642	399,6	5,82	29,20	23,38	2,989	109,01	34,15	47,03	0,726
136	2,635	1,678	0,637	423	5,82	25,18	19,36	3,077	93,18	29,16	39,26	0,743
137	2,985	2,349	0,786	456,5	5,67	22,65	16,98	3,199	84,88	26,57	44,15	0,602
138	3,235	2,711	0,838	455,5	5,67	21,95	16,28	3,196	81,09	25,41	47,75	0,532
139	3,485	3,036	0,870	450,5	5,72	21,50	15,78	3,181	78,14	24,48	51,36	0,477
140	3,885	3,516	0,905	453,5	5,72	20,90	15,18	3,190	75,23	23,57	57,13	0,413
141	4,385	4,113	0,936	454,3	5,70	19,61	19,91	3,193	68,88	21,58	64,20	0,336
142	4,635	4,409	0,950	462,2	5,70	18,71	13,01	3,222	64,93	20,34	67,76	0,300
143	4,985	4,814	0,965	480	5,70	17,02	11,32	3,284	57,50	18,02	72,74	0,248

Digitized by Google

NOTE

SUR

L'ÉCOULEMENT DE L'EAU CHAUDE

PAR LES TUYÈRES

Par M. A. RATEAU, Ingénieur au Corps des Mines.

Dans cette courte note, je me propose d'analyser le phénomène de l'écoulement de l'eau chaude par une tuyère convergente et d'expliquer les résultats, assez singuliers au premier abord, obtenus par MM. Sauvage et Pulin dans les expériences qu'ils ont faites, en 1892 (*).

La théorie que j'ai développée dans le travail précédent à propos de l'écoulement de la vapeur s'étend sans difficulté au problème un peu plus complexe de l'eau chaude, qui se vaporise partiellement pendant la détente.

Le cas le plus simple, que je traiterai d'abord, est celui où on suppose que l'eau se trouve initialement, dans le récipient d'amont, exactement à la température T_0 de la vapeur qui correspond à sa pression P_0, c'est-à-dire juste sur le point de se vaporiser. Dès lors, elle se vaporisera effectivement en partie dès que sa pression et sa température s'abaisseront.

Une circonstance remarquable donne au phénomène une allure très spéciale. Cette circonstance est que la quantité vaporisée, d'une part, et la vitesse d'écoulement

(*) Ed. Sauvage, *Ecoulement de l'eau des chaudières* (*Annales des Mines*, 9e série, t. II, p. 192).

Digitized by Google

du mélange d'eau et de vapeur formé, d'autre part, sont l'une et l'autre sensiblement proportionnelles à l'abaissement de température.

Reportons-nous, en effet, au diagramme entropique (*fig.* 1) (*).

Soit AD la courbe d'entropie de l'eau, EF la courbe de la vapeur saturante;

Soit A le point figuratif de l'eau chaude à la température T_0 sous la pression correspondante P_0.

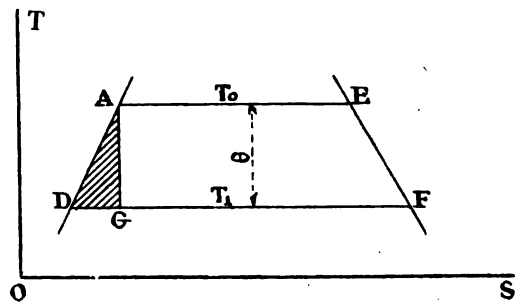


Fig. 1.

Pendant la détente dans la tuyère, il se produit une petite quantité de vapeur qui forme avec l'eau restante un mélange plus ou moins homogène. On doit admettre, en raison du très court espace de temps que le fluide reste en contact avec les parois de la tuyère, que la détente est adiabatique. Cette détente adiabatique est alors figurée sur le diagramme d'entropie par la parallèle AG à l'axe des températures. Quand le mélange est parvenu à la température T_1 différant de T_0 de la quantité θ, la proportion x de vapeur formée est donnée par le rapport du

(*) Je rappelle que l'utilisation du diagramme entropique pour l'étude de la vapeur d'eau a fait l'objet d'articles remarquables de M. le Prof. Boulvin dans la *Revue de Mécanique* en 1897 et 1901.

Digitized by Google

segment de droite DG à DF. Or la courbe AD d'entropie de l'eau se confond sensiblement avec sa tangente au point A, tant que l'abaissement de température θ n'est pas grand ; DG est donc proportionnel à cet abaissement de température (avec une tendance, cependant, à croître un peu plus vite que θ), et l'on peut écrire que le rapport de DG à DF est à peu près proportionnel à θ, c'est-à-dire :

$$x = a\theta,$$

a étant un coefficient qui dépend de la température initiale T_0 et dont la valeur numérique se trouve aisément à l'aide du diagramme d'entropie tracé à grande échelle.

D'un autre côté, la vitesse d'écoulement V, au moment où la température est devenue T_1, est donnée par la surface du triangle AGD. La base de ce triangle est approximativement égale à $x\frac{r}{T_0}$, r étant la chaleur de vaporisation de l'eau ; on a donc la relation suivante :

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{1}{2} E x \theta \frac{r}{T_0} = \frac{1}{2} E a \theta^2 \frac{r}{T_0},$$

d'où :

$$V = \theta\sqrt{gEa\frac{r}{T_0}}. \tag{1}$$

Calculons maintenant la section de tuyère nécessaire pour faire écouler l'unité de masse d'eau quand la température s'est abaissée de θ. Cette section est égale au volume spécifique v du mélange d'eau et de vapeur divisé par la vitesse V.

Le volume spécifique v est égal à $1 - x + \frac{x}{\gamma}$, γ étant le poids spécifique de la vapeur saturante à la température $T_1 = T_0 - \theta$; ou, en remplaçant x par sa valeur $a\theta$,

$$v = 1 - a\theta + \frac{a\theta}{\gamma}. \tag{2}$$

Digitized by Google

En divisant v par V, on déduit s :

$$(3) \qquad s = \frac{1}{\sqrt{gEa\,\frac{r}{T_0}}}\left(\frac{1}{\theta} + \frac{a}{\gamma} - a\right).$$

Pour T_0 donné, a ainsi que r sont déterminés ; il n'y a donc de variable dans s que l'abaissement de température θ et le poids spécifique γ qui est fonction de $T_0 - \theta$. Dès lors, s croît ou décroît en même temps que la quantité $\frac{1}{\theta} + \frac{a}{\gamma}$; et, puisque a est très petit, s est sensiblement proportionnel à cette quantité. Or, quand θ croît, $\frac{1}{\theta}$ décroît ; mais, d'autre part, le poids spécifique γ diminue et, par conséquent, le second terme $\frac{a}{\gamma}$ croît. Il arrive un moment où l'augmentation du second compense la diminution du premier. La quantité $\frac{1}{\theta} + \frac{a}{\gamma}$ passe donc par un minimum.

Pour résoudre analytiquement cette question du minimum, il faudrait savoir exprimer γ en fonction de la température.

A défaut d'une relation simple entre ces quantités, on peut résoudre le problème à l'aide des tables de Regnault. Je donnerai un exemple.

Supposons le cas où P = 10 kilogrammes par centimètre carré, auquel correspond $T_0 = 178^\circ,886 + 273^\circ$.

On trouve par le diagramme d'entropie $a = 0,00216$; et les tables donnent le poids spécifique γ. Il faudra faire attention que γ devra être exprimé en kilogrammes par décimètre cube.

Voici les valeurs de la quantité $\frac{1}{\theta} + \frac{a}{\gamma}$ pour des θ croissants autour de la valeur qui donne le minimum.

Digitized by Google

Pour $\theta =$	6°..... $\frac{1}{\theta} + \frac{a}{\gamma} =$	0,6501
	7°.....	0,6374
	8°.....	0,6300
	9°.....	0,6274
	10°.....	0,6293
	11°.....	0,6325
	12°.....	0,6355

En traçant la courbe, on voit que le minimum a lieu pour $\theta = 9°,2$ approximativement. A cette valeur de θ correspond une valeur de la pression absolue égale à $8^{kg},044$ par centimètre carré. Par conséquent, dès que la pression est tombée au-dessous de 80 p. 100 de la pression d'amont, environ, il faudrait que la tuyère devînt divergente pour que le mélange d'eau et de vapeur continuât de s'y détendre.

Si la tuyère est seulement convergente, la pression à la dernière section de la tuyère sera précisément égale à la valeur que nous venons de dire, et le fluide entrant dans une enceinte où la pression est beaucoup plus basse — par exemple dans l'atmosphère — fera explosion en tous sens (sauf vers l'amont), beaucoup plus fortement que dans le cas de l'écoulement de la vapeur seule ; c'est pourquoi on voit la veine s'élargir brusquement et prendre la forme d'un paraboloïde très évasé, comme le montrent les reproductions photographiques données dans le mémoire de M. Sauvage.

Le gonflement latéral de la veine est énorme dès la sortie de la tuyère, parce que, ainsi que nous allons le voir, la vitesse d'écoulement du mélange fluide n'est pas grande. Il est d'autant plus accusé que la pression dans l'enceinte d'aval est plus basse, au-dessous de la pression p du maximum de débit.

Le débit par unité de section de la dernière tranche de la tuyère se calcule en le faisant correspondre à la

Digitized by Google

pression p qui donne à la quantité $\frac{1}{\theta} + \frac{a}{\gamma}$ son minimum

En faisant ce calcul, nous trouvons d'abord que la quantité x de vapeur formée est égale à 1,99 p. 100, puis que le volume spécifique du mélange atteint la valeur 5,78, c'est-à-dire que, à la sortie de la tuyère, la vapeur occupe un volume de 4,78 fois celui de l'eau. La vitesse V du mélange à la sortie est égale à $28^m,55$ par seconde. Enfin, le poids de fluide écoulé est égal à 494 grammes par centimètre carré d'orifice et par seconde.

Il est intéressant de comparer ce dernier chiffre à celui qui aurait lieu si c'était de la vapeur initialement saturante qui coulait par l'orifice. Dans ce dernier cas, la quantité débitée serait égale à 143 grammes par centimètre carré et par seconde. Avec l'eau chaude, le débit est donc 3,5 fois plus grand.

Si l'on voulait continuer la détente dans la tuyère, il faudrait donner à celle-ci, après la partie la plus rétrécie, une forme divergente. On voit en CMD (*fig.* 2) la courbe des sections (en ordonnées) en fonction de la chute de température θ, pour le cas où $P_0 = 6$ kilogrammes par centimètre carré, l'eau étant toujours supposée initialement saturante.

Quand il s'agit de l'écoulement de la vapeur initialement saturante, on trouve que la valeur du rapport $\frac{p}{P_0}$, qui correspond au minimum de section (c'est-à-dire aussi au maximum du débit), est égale à 0,58 et qu'elle est sensiblement indépendante de la pression initiale P_0. Ici, avec l'eau chaude, nous venons de trouver que, lorsque $P_0 = 10$ kilogrammes par centimètre carré, la valeur du rapport $\frac{p}{P_0}$, qui correspond au minimum de section, est égale à 0,804, valeur beaucoup plus grande que la précédente. En répétant les mêmes calculs pour des pressions initiales différentes,

Digitized by Google

on verrait que la valeur du rapport qui correspond au minimum varie beaucoup avec la pression d'amont. Elle se rapproche de l'unité à mesure que la pression P_0 décroît. Ainsi, pour $P_0 = 6$ kilogrammes par centimètre carré, on trouve que l'abaissement de température θ qui donne le minimum de $\frac{1}{\theta} + \frac{a}{\gamma}$ est égal à 7°,15, puis que $\frac{p}{P_0} = 0{,}829$; la vitesse d'écoulement à la sortie de la tuyère n'est plus que de $22^m{,}53$ par seconde, et le débit 344 grammes par seconde.

Supposons maintenant que l'eau se trouve initialement à une température inférieure de t à celle T, qui correspond à la vaporisation sous la pression P_0. Il y aura alors retard à la vaporisation pendant la détente. Tant que l'abaissement de pression ne sera pas suffisant, l'eau restera entièrement à l'état liquide et coulera à la manière ordinaire des liquides; puis, à une pression plus basse, il y aura vaporisation partielle, et il arrivera encore un moment où l'augmentation du volume spécifique compensera l'augmentation de vitesse. A ce moment, la section d'écoulement passera par un minimum. Le retard t de la température a donc pour effet d'accroître rapidement le débit possible par unité de section d'une telle tuyère. Nous allons voir d'ailleurs, par un exemple, que, sauf pour de très petits retards de température, le minimum de section correspond précisément au point où la vaporisation commence à se faire.

Si on appelle P′ la pression qui existe au point où la vaporisation commence (c'est la pression qui correspond à la température $T_0 - t$ pour la vapeur saturante), puis θ l'abaissement de température à partir de ce point, la vitesse d'écoulement est donnée par la relation :

$$(4) \qquad \frac{V^2}{2g} = \frac{P_0 - P'}{\varpi} + \frac{1}{2} g E a \theta^2 \frac{r}{T_0 - t},$$

Digitized by Google

ϖ étant le poids spécifique du liquide, et a ayant la signification déjà dite ; quant au volume spécifique du mélange, il a toujours pour expression :

$$V = 1 - a\theta + \frac{a\theta}{\gamma}.$$

La discussion analytique est ici encore plus impossible que précédemment. Mais on peut traiter des cas déterminés au moyen des tables de Regnault. On voit alors qu'il suffit de quelques degrés d'écart pour augmenter énormément le débit. Ainsi, par exemple, pour obtenir sans vaporisation le débit de tout à l'heure, 494 grammes par seconde pour la pression de 10 kilogrammes par centimètre carré, il suffit que la vitesse V s'élève seulement à $4^m,94$, et, à cette valeur, correspond d'abord $P_0 - P' = 0,124$, puis $t = 0^\circ,54$. Cette faible valeur montre bien l'influence considérable que le retard de température exerce sur le débit par une tuyère convergente.

Or la température de l'eau d'un générateur, dans les différents points, a toujours un retard sur la température de vaporisation. Ce retard s'élève facilement à plusieurs degrés, et il est d'ailleurs très variable, non seulement d'un point à l'autre du générateur, mais encore d'un moment à l'autre, suivant l'état des courants intérieurs et suivant l'activité de la vaporisation. On doit donc s'attendre à trouver des débits extrêmement variables, ainsi qu'il a été constaté dans les expériences de MM. Sauvage et Pulin. L'accroissement du débit par rapport à celui qui aurait lieu s'il n'y avait aucun retard de température donne en quelque sorte la mesure du retard de température.

A mesure que ce retard augmente, l'écoulement tend de plus en plus à se rapprocher de celui du simple liquide. Il n'en diffère plus du tout quand la température

Digitized by Google

initiale $T_0 - t$ de l'eau est égale ou inférieure à celle de la vapeur qui correspond à la pression P_1 dans l'enceinte d'aval. Le débit atteindrait alors la valeur

$$\sqrt{2g\frac{P_0 - P_1}{\varpi}}$$

par centimètre carré et par seconde.

Le débit réel constaté doit être toujours compris entre cette dernière valeur et celle que nous avons appris à calculer quand l'eau se trouve initialement à la température T_0. Par exemple, pour la pression initiale de 6 kilogrammes par centimètre carré, l'écoulement ayant lieu dans l'atmosphère, le débit par seconde et par centimètre carré doit être compris entre 3.130 grammes et 344 grammes, chiffre indiqué précédemment. Dans leurs expériences, MM. Sauvage et Pulin ont trouvé des débits irréguliers variant, pour cette pression de 6 kilogrammes par centimètre carré, autour de 1.350 grammes, ce qui semblerait indiquer que, dans les conditions où ils ont opéré, l'eau se trouvait à une température de 6° environ inférieure à celle de la vapeur pour la même pression.

A titre d'exemple, je donne dans la *fig.* 2 les sections d'écoulement de l'eau chaude, pour une pression initiale de 6 kilogrammes par centimètres carré, et avec des retards de température t croissant de degré en degré. La chute totale $t + \theta$ de température est portée en abscisse pendant que les ordonnées indiquent les sections d'écoulement en centimètre carrés pour un débit de 1 kilogramme par seconde. La courbe AB est celle de l'écoulement de l'eau froide (sans vaporisation) ; CMD, celle de l'eau chaude initialement saturante ($t = 0$) ; les courbes 3, 4, ..., 9 correspondent aux cas où le retard est de 1°, 2°, etc.

Pour 2° de retard, par exemple, l'eau s'écoule d'abord sans vaporisation, et les sections décroissent jusqu'en c ;

Digitized by Google

puis, dès qu'il y a vaporisation, les sections doivent augmenter. On voit donc que, si la tuyère est convergente,

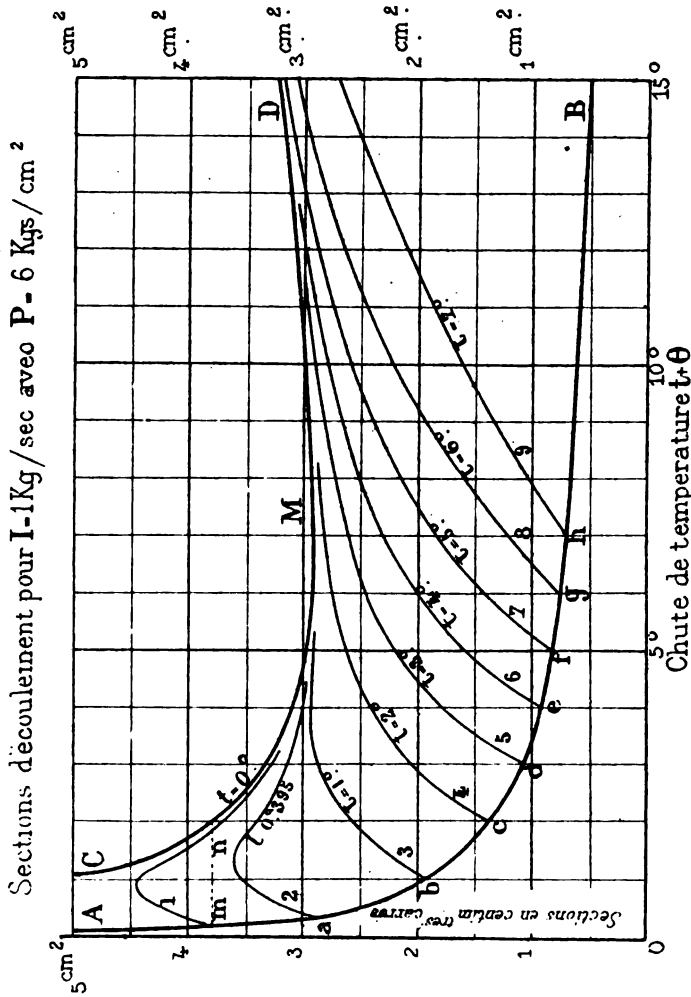


FIG. 2.

l'eau chaude sortira sans s'être aucunement vaporisée, avec sa température initiale et à la pression qui correspond à cette température pour la vapeur saturante.

Digitized by Google

Toutefois, ceci n'est pas absolument général. Si on trace les courbes de sections pour des retards inférieurs à 1° environ, on constate qu'elles présentent deux minima successifs, comme la courbe 2. Le premier minimum *a* est un point anguleux, l'autre se trouve dans le voisinage du point M de la courbe CD. De plus, quand *t* est plus petit que 0°,395, le premier minimum est plus grand que le second, ainsi qu'on le voit sur la courbe 1. Il résulte de cette forme singulière de la courbe des sections que l'écoulement, quand il a lieu dans une tuyère convergente, doit subir une *discontinuité*, car il est impossible que le fluide prenne les états qui correspondent à la partie de la courbe comprise entre les points *m* et *n*. Puisque les sections de la tuyère vont toujours en décroissant, il est nécessaire qu'il y ait un saut brusque de *m* en *n*, c'est-à-dire une vaporisation partielle instantanée, et d'autre part, ce qui est bien curieux, une augmentation de vitesse également instantanée.

Ce phénomène remarquable d'une variation brusque dans la vaporisation et dans la vitesse demanderait à être soumis à un examen approfondi. Il peut sembler, *à priori*, incompatible avec les lois de l'inertie des corps matériels ; mais, en y réfléchissant, on peut voir, je crois, que des discontinuités ne sont pas impossibles quand il s'agit de corps fluides pouvant être décomposés en réalité, et non pas seulement par la pensée, en masses élémentaires infiniment petites.

Je me bornerai ici à ces quelques considérations, qui suffisent pour montrer que l'écoulement d'un liquide chaud présente des particularités très dignes d'attirer l'attention.

Digitized by Google

REVUE
DE LA
CONSTRUCTION DES MACHINES
EN L'AN 1900

Par M. Ed. SAUVAGE, Ingénieur en Chef des Mines,
Professeur à l'École Nationale Supérieure des Mines.

(*Suite*) (*).

ADDITIONS AUX CHAPITRES PRÉCÉDENTS.

Un indicateur d'ordonnée moyenne, pour les cylindres de machine à vapeur, a été récemment décrit par M. William Ripper, dans les *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* (1899, p. 569). L'appareil plus ancien de M. Janet est décrit dans *la Machine à vapeur*, par Ed. Sauvage (t. I, p. 97).

En ce qui concerne la mesure du pouvoir calorifique des combustibles, le *Congrès international de Mécanique appliquée*, tenu à Paris en 1900, a émis le vœu suivant (t. II, p. 72) :

« Que le pouvoir calorifique d'un combustible soit défini comme il suit : c'est le nombre de calories que dégage 1 kilogramme de combustible complètement brûlé sous pression constante, les éléments et les produits de la combustion étant ramenés à 0° et à la pression de $0^m,76$ de mercure. »

Sur les machines marines, on lira avec grand intérêt une conférence de M. L.-E. Bertin, dans le *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (année 1899, p. 1404).

(*) Voir *Annales des Mines*, 9e série, t. XIX (6e livraison 1901), p. 579 à 620, et XX (8e livraison 1901), p. 103 à 142.

Digitized by Google

CHAPITRE VI.

DÉTAILS DE CONSTRUCTION DES MACHINES A VAPEUR.

Une étude sérieuse des détails de construction des

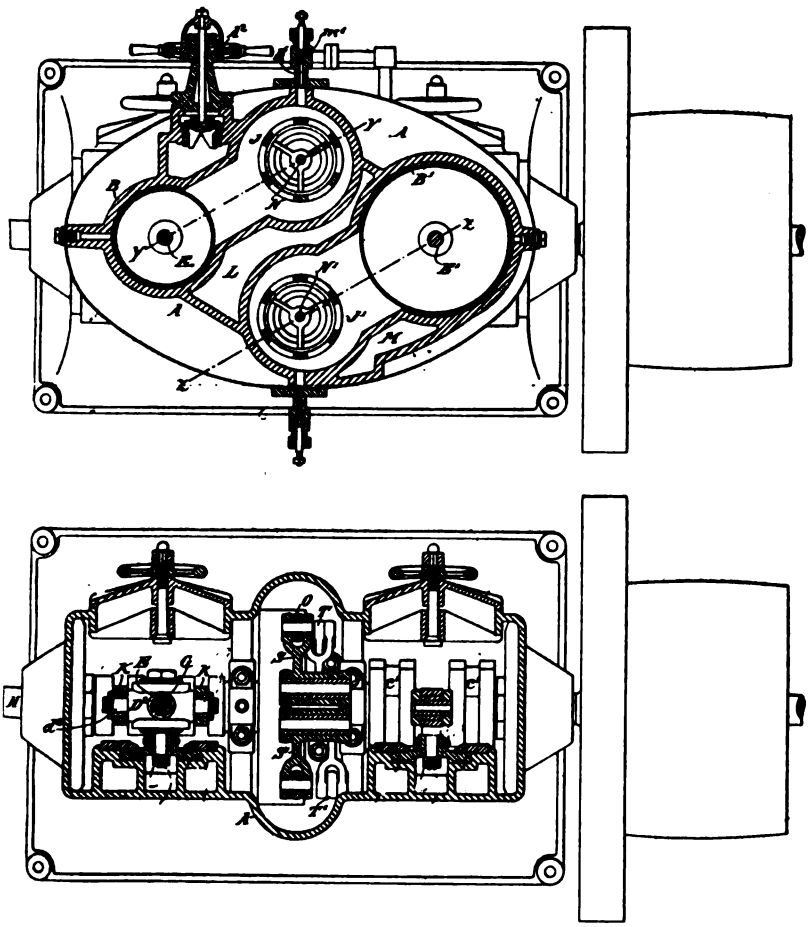


FIG. 46. — Machine compound Merz : coupe *vv* et *ww*.

machines à vapeur exigerait des développements fort

Digitized by Google

étendus : on ne peut signaler ici que quelques points spéciaux.

On recherche, surtout dans les machines rapides, les moyens de supprimer ou d'atténuer les vibrations, non

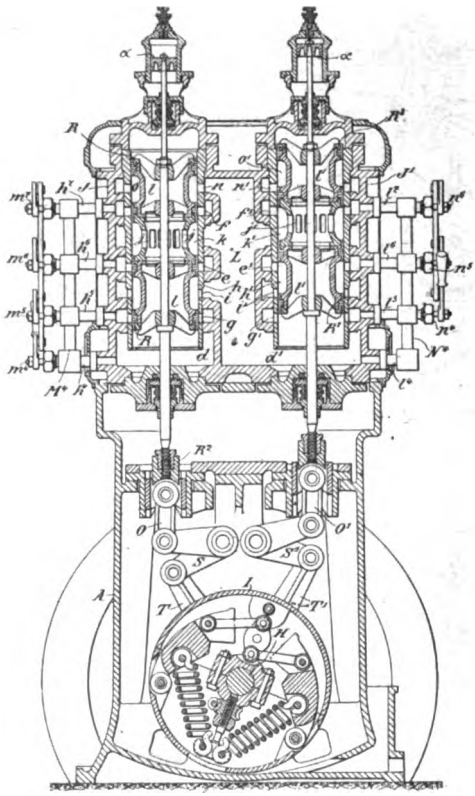


FIG. 47. — Machine Merz : coupe *xx*.

seulement pour les machines marines, mais aussi pour les moteurs fixes. Plusieurs dispositions étudiées à cet effet ont déjà été indiquées. On peut signaler encore celle des machines de Merz, qui figuraient à l'Exposition de 1900.

Digitized by Google

Les *fig.* 46 à 52 représentent, d'après la *Revue de Mécanique* (1898, 2e sem., p. 678), une des dispositions adoptées par M. Merz ; chacun des cylindres de cette machine compound contient deux pistons à mouvements

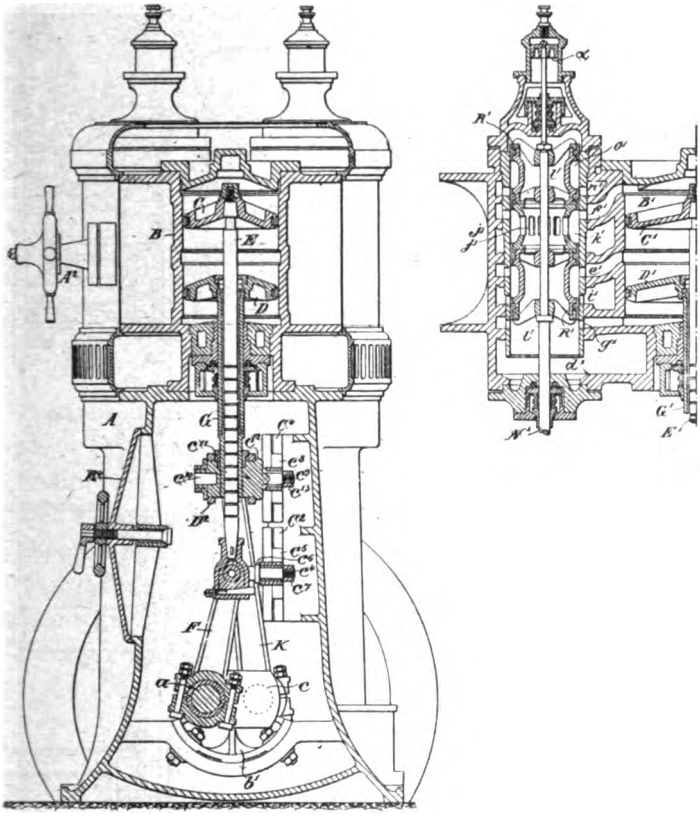


Fig. 48 et 49. — Machine Merz : coupe par le petit cylindre et *yy*.

opposés, commandant des manivelles calées à 180° l'une de l'autre ; les manivelles des deux groupes sont à 90°. On équilibre ainsi les pièces en mouvement, et la marche est très douce.

Digitized by Google

La machine de Wigzell (*fig.* 53) est un exemple de la transmission par bielles triangulaires (*Bulletin de la Société*

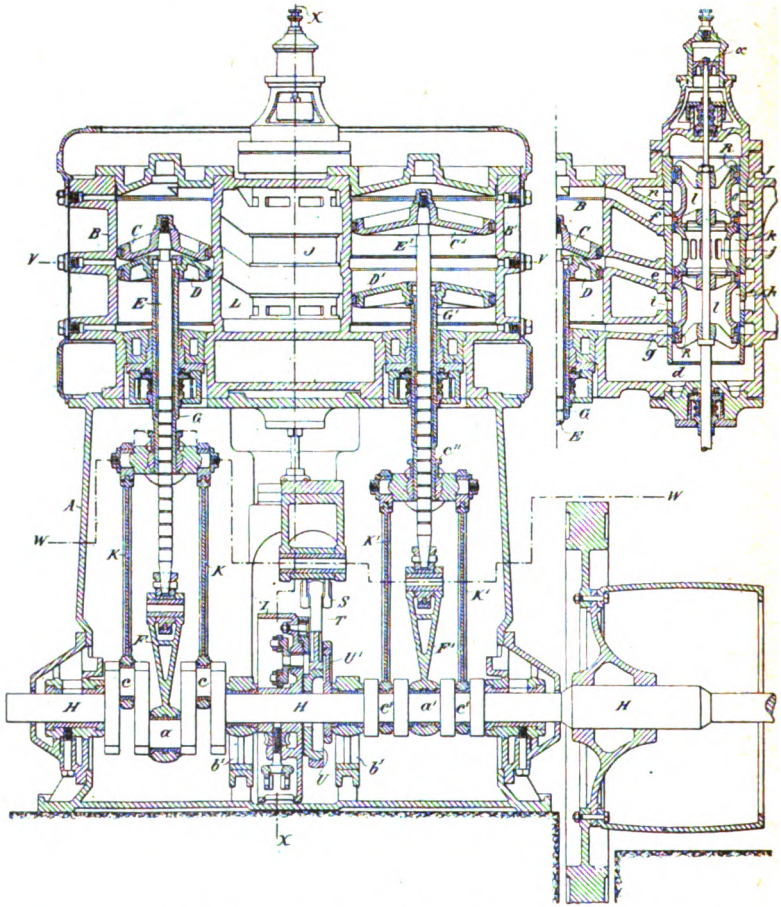


FIG. 50. — Machine Merz : coupe verticale et longitudinale et coupe *zz*.

d'encouragement pour l'industrie nationale, 1895, p. 577); cette machine, à triple expansion, présente, en outre, des pistons à mouvements opposés dans chaque cylindre. Les

Digitized by Google

pistons inférieurs attaquent une bielle triangulaire médiane ;

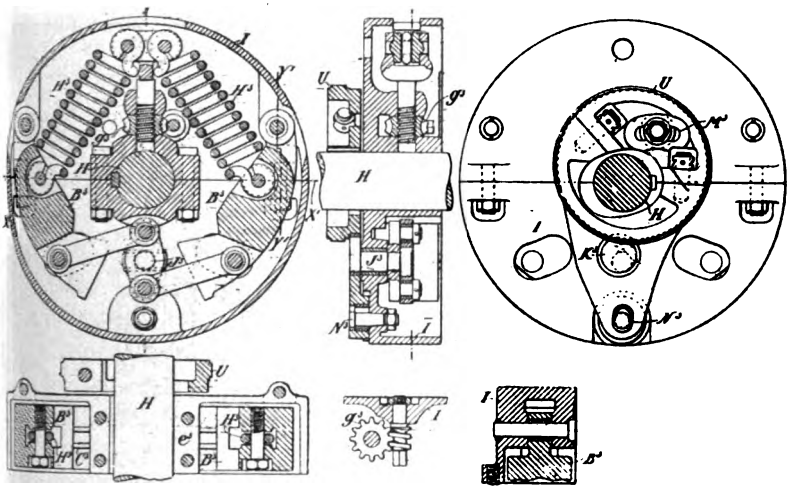


Fig. 51. — Machine Merz : détail du régulateur.

les pistons supérieurs, deux bielles triangulaires, agissant sur des manivelles calées à 180° de celle que commande la bielle médiane. Les pistons ne sont pas tous en même temps à fond de course, de sorte que la machine n'a pas de points morts.

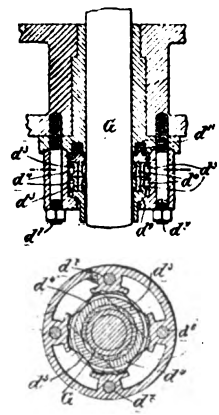


Fig. 52. — Machine Merz : détail d'une presse-garniture.

Pour la construction des machines, l'emploi des pièces coulées en acier se répand de plus en plus. En remplaçant par l'acier la fonte, on obtient une pièce beaucoup plus résistante, ou bien, si on ne tient pas à augmenter dans de fortes proportions la résistance, on a une pièce bien plus légère. L'acier moulé a été quelquefois, mais rarement encore, employé pour les cylindres, ayant d'ailleurs des chemises en fonte

Digitized by Google

rapportées. Les pistons des grandes machines fixes commencent à se couler en acier, comme ceux des machines marines.

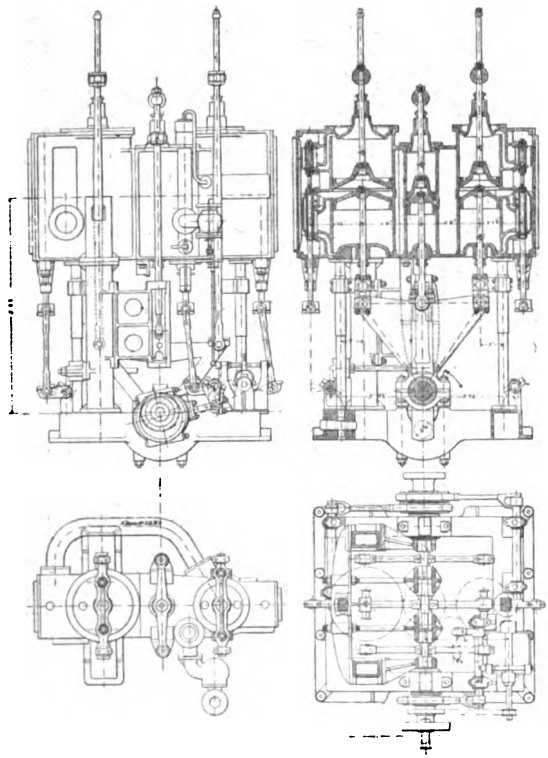


Fig. 53. — Machine Wigzell à bielles triangulaires et à pistons opposés (*Revue de Mécanique*, 1899, 1er sem., p. 559).

L'acier moulé remplace aussi, dans certains cas, des pièces forgées : notamment dans les locomotives, cet emploi est assez fréquent. Il est probable que cette substitution de l'acier coulé au métal forgé deviendra prochainement de plus en plus fréquente.

Les coussinets sont fréquemment revêtus de métal blanc

Digitized by Google

antifriction, de sorte que l'emploi du bronze n'est plus indispensable. Dans certains cas cependant, on conserve quelques parties en bronze, pour maintenir les pièces en place dans le cas de fusion du métal blanc.

Le graissage doit être très soigneusement étudié : il y a certainement des progrès à réaliser de ce côté, et la question est, du reste, l'objet d'études et de recherches importantes. Pour graisser les tiroirs et les pistons, surtout lorsqu'on emploie la vapeur à très haute température, il faut se servir d'huiles minérales qui ne se décomposent pas ou ne deviennent pas trop fluides à cette température. Parmi les appareils graisseurs des cylindres, les meilleurs sont ceux qui consistent en une pompe injectant l'huile régulièrement et en quantité bien dosée.

Pour les mécanismes, le graissage est souvent encore fait d'une manière un peu rudimentaire. On obtient un graissage continu par l'emploi des *lécheurs*, employés depuis longtemps dans les machines marines, ou à l'aide de tuyaux articulés qui relient les godets fixes aux pièces mobiles. Les boutons de manivelle sont graissés à l'aide d'un tuyau formant contre-manivelle, recevant l'huile sur l'axe de rotation et la distribuant par des canaux percés dans le bouton de manivelle et débouchant au milieu de la surface frottante.

Pour lubrifier les mécanismes des machines rapides, souvent on les enferme dans une enveloppe hermétiquement close, à travers laquelle sort l'arbre moteur. Cette enveloppe contient une quantité d'huile assez grande, qui est atteinte et projetée en tous sens par la manivelle.

Un moyen très efficace pour assurer le graissage consiste à refouler l'air sous pression entre les surfaces frottantes, à l'aide d'une pompe. Les applications de ce système logique sont encore assez rares.

Digitized by Google

CHAPITRE VII.

CONDENSATION.

Les condenseurs des machines à vapeur s'installent de bien des manières différentes, et les dispositions an-

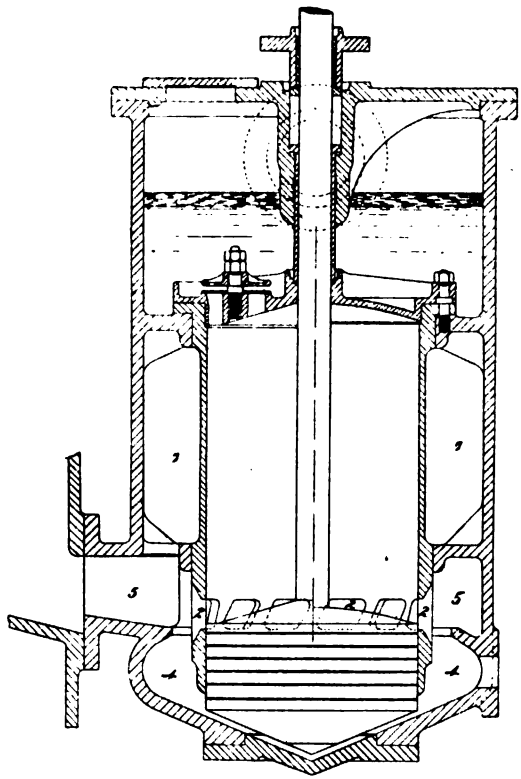


Fig. 54. — Pompe à air Edwards (d'après le mémoire de M. Nadal dans la *Revue de Mécanique*, juin 1901, p. 614).

ciennes continuent à être employées. On munit encore le plus souvent chaque machine importante de son con-

Digitized by Google

denseur avec a pompe à air; parfois même on voit, dans les machines horizontales à deux groupes de cylindres, deux condenseurs séparés, un pour chaque groupe, sans que les avantages de cette complication soient bien apparents. Cependant, on peut citer un certain nombre d'installations de condenseurs centraux desservant plusieurs moteurs.

M. J. Nadal a publié récemment, dans la *Revue de Mécanique* (1901, 1er sem., p. 129 et 609), une étude détaillée des condenseurs, où il expose la théorie et donne la description des appareils.

Dans les condenseurs centraux munis d'un moteur spécial à vapeur, il est important que ce moteur ne dépense pas trop de vapeur : on fait parfois usage, par la commande des pompes de ces condenseurs, de moteurs à action directe, pour lesquels cette condition importante n'est pas satisfaite.

Certaines pompes à air n'ont pas de clapets d'aspiration, ce qui simplifie l'entretien : l'eau et l'air pénètrent dans le corps de pompe par des orifices que le piston démasque dans sa course. Par exemple, dans la pompe verticale Edwards (*fig.* 54), le piston au bas de sa course découvre des orifices, et, en même temps, chasse l'eau accumulée dans la chambre 4, qui pénètre dans le corps de pompe en entraînant l'air logé en 5 et en 7. Dans la pompe horizontale Eastwood et Smith (*fig.* 55), les orifices sont au milieu du corps de la pompe, qui est à double effet; mais, comme ils n'existent qu'à la partie supérieure, toute l'eau qui y pénètre y reste sans être renvoyée au condenseur pendant la première moitié de la course de refoulement.

Les dispositions qui permettent de refroidir l'eau qui a servi à la condensation, lorsqu'elle n'est pas abondante, sont assez fréquentes. L'eau chaude, élevée à quelques mètres de hauteur, tombe sur une série de chicanes qui

Digitized by Google

la divisent en gouttelettes et la mettent en contact avec l'air. En entourant l'appareil d'une hotte rectangulaire tronconique assez élevée, on se débarrasse des buées

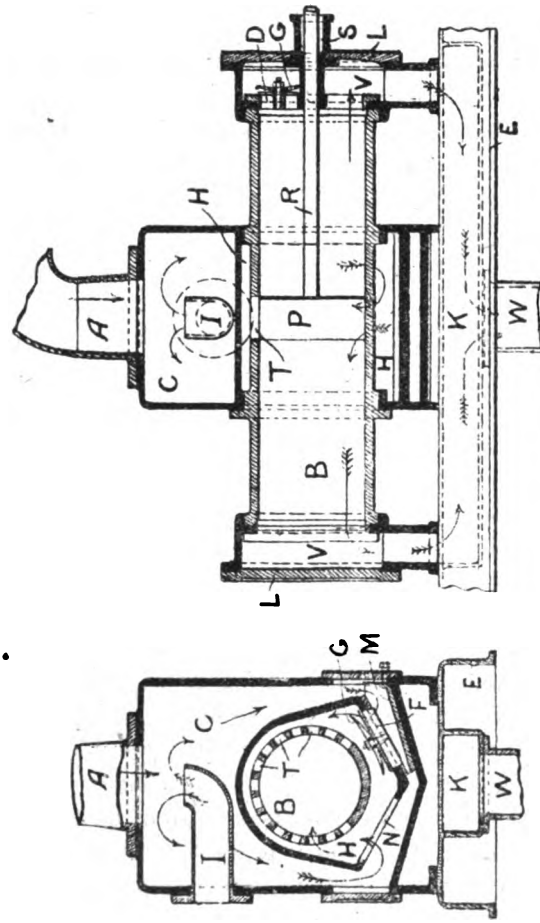


FIG. 55. — Pompe à air Eastwood et Smith (d'après le mémoire de M. Nadal dans la *Revue de Mécanique*, juin 1901, p. 620).

gênantes, qui sont rejetées par une cheminée à une assez grande hauteur, et, de plus, on crée un tirage qui fait circuler l'air.

Digitized by Google

Dans certaines installations, un ventilateur (*) active la circulation de l'air.

Les *condenseurs vaporisateurs* paraissent assez répandus, notamment en Angleterre, lorsque l'eau est rare et lorsqu'on ne dispose pas d'espace suffisant pour les appareils refroidisseurs d'eau de condensation. Ils consistent en faisceaux de tubes, dans lesquels pénètre la vapeur, et qui sont arrosés d'eau à l'extérieur; cette eau s'évapore avec ou sans le concours d'un ventilateur. Pour augmenter la surface, on fait parfois usage de tubes ondulés ou tordus. L'eau est guidée sur la surface extérieure par une hélice ou un treillis en fil de fer ou grâce à diverses dispositions.

Ces appareils ont été décrits dans la *Revue de Mécanique* (1899, 1er sem., p. 524), d'après une communication de M. Oldham à l'*Institution of Mechanical Engineers* de Londres. La dépense totale d'eau n'est guère que les 7 dixièmes de ce qu'elle serait sans la condensation.

Par exemple, un condenseur Ledward, installé à Londres (usine électrique de Kensington) pour condenser 9.000 kilogrammes de vapeur à l'heure, se compose de tubes longs de 1m,50 avec un diamètre de 125 mm à l'intérieur. Le vide est de 580 à 680 mm de mercure. Un condenseur Fraser, installé à Londres pour le chemin de fer électrique de Waterloo, se compose de tubes longs de 5m,45, avec diamètre de 75 mm, arrosés d'eau et recevant l'air de ventilateurs. Un condenseur Thiesen, pouvant condenser par heure 6 mètres cubes d'eau, occupe, d'après le constructeur, 9,3 mètres carrés, sur une hauteur de 4m,20, emploie 10 mètres cubes d'eau de circulation par heure et absorbe une puissance de 10 chevaux.

(*) Voir notamment *Revue de Mécanique*, 1897, p. 813, et 1899, 1er sem., p. 225.

Digitized by Google

D'une manière générale, l'auteur du mémoire sur ces appareils conseille une surface de 6 mètres carrés pour condenser par minute 1 kilogramme de vapeur.

Dans l'aéro-condenseur Fouché, cité à propos de l'Exposition de 1889 (*Annales des Mines*, 8e série, t. XVIII, p. 475), l'air seul était employé au refroidissement des tubes; mais l'appareil était destiné, en outre, à servir au chauffage des ateliers.

Les applications des condenseurs à jet, tels que celui de Kœrting, paraissent assez limitées, sans doute parce qu'elles exigent beaucoup d'eau et ne donnent pas un très bon vide.

On trouvera dans le travail déjà cité de M. Abraham (*Annales des Mines*, 9e série, t. XIX, p. 323) quelques détails sur ces appareils, ainsi que sur le condenseur Weiss, à pompe à air seul, déjà cité dans la notice faite à la suite de l'Exposition de 1889 (*Annales des Mines*, 8e série, t. XVII, p. 544) (*).

Il ne semble pas qu'il y ait de dispositions nouvelles importantes à signaler au sujet des condenseurs à surface, employés en mer et quelquefois à terre, quand on ne dispose que d'eau impropre à l'alimentation des chaudières.

Le condenseur porte habituellement un *indicateur de vide*, qui montre la différence entre la pression de l'atmosphère à l'extérieur et la pression à l'intérieur de l'appareil. Cette indication est incomplète, car il faudrait mesurer, en outre, la pression atmosphérique, pour connaître la pression réelle dans le condenseur; en pratique, c'est surtout quand une machine est installée dans une station d'altitude élevée que la pression atmosphérique

(*) Cet appareil est décrit dans un récent ouvrage de M. Weiss, *Kondensation* (Berlin, J. Springer), qui existe à la bibliothèque de l'École nationale supérieure des Mines.

Digitized by Google

s'écarte notablement de la moyenne admise d'habitude.

Ce mode de mesure est, d'ailleurs, peu clair pour beaucoup de personnes, et il ne correspond plus au mode de fonctionnement des machines, où l'atmosphère ne joue aucun rôle.

Il serait préférable de monter sur les condenseurs de simples manomètres indiquant la pression absolue qui y règne ; ces manomètres devraient, d'ailleurs, être gradués en grammes par centimètre carré et non en millimètres de mercure.

On peut objecter que la même observation s'applique en principe à la mesure de la pression effective des chaudières ; cela est exact ; mais, en pratique, l'effet des variations de la pression atmosphérique est insignifiant à côté de la pression des chaudières.

Le Congrès de Mécanique appliquée, tenu à Paris en 1900, a émis le vœu « que, dans les moteurs à pression, les pressions qui s'exercent sur les faces du piston, tant à l'admission qu'à l'échappement, soient exprimées dans l'unité métrique, c'est-à-dire en kilogrammes absolus par centimètre carré (*). »

CHAPITRE VIII.

PRODUCTION DE LA VAPEUR.

Dans la transformation du pouvoir calorifique des combustibles en puissance motrice, la production de la vapeur reste toujours la partie la plus difficile à bien régler : des écarts assez considérables peuvent se produire dans l'utilisation du combustible sans qu'il soit facile de les éviter. La mesure des quantités de combustible consom-

(*) *Congrès international de Mécanique appliquée* (en 1900), t. II (*Séances du Congrès*), p. 87.

Digitized by Google

mées et de vapeur d'eau produite permet seule de bien contrôler la marche des générateurs.

Sur les essais de chaudières et la comparaison des divers types, on consultera utilement l'ouvrage de M. Bryan Donkin, *the Heat Efficiency of steam boilers : land, marine, and locomotive* (Londres, 1898) (*).

Désignation des chaudières. — Il existe trois grandes catégories de chaudières, celles à grands corps, à tubes parcourus par les gaz chauds et à tubes chauffés extérieurement, auxquelles s'ajoutent des appareils intermédiaires. Plusieurs noms différents sont employés couramment pour désigner les chaudières à tubes, suivant qu'ils sont chauffés intérieurement ou extérieurement. Pour faire cesser l'incertitude de ces désignations multiples, le Congrès international de Mécanique appliquée, tenu à Paris en 1900, a émis le vœu :

« Que les dénominations ci-après soient généralement adoptées : on désignerait sous le nom de « chaudières à tubes de fumée » les générateurs à tubes baignés par l'eau à l'extérieur et parcourus intérieurement par les gaz de la combustion (type locomotive) ;

« Chaudières à tubes d'eau », les générateurs formés de tubes contenant l'eau à l'intérieur et léchés extérieurement par les gaz ; on les distinguera, s'il y a lieu, en chaudières à gros tubes d'eau (types Belleville, de Naeyer, Babcock et Wilcox, etc.) et chaudières à petits tubes d'eau (types Thornycroft, Normand, etc.).

« Les chaudières comportant à la fois des tubes à eau et des tubes à fumée (ancien type Roser) ou composées d'éléments divers, seront dénommées « chaudières mixtes. »

On consultera avec fruit, sur les chaudières, *la Mécanique à l'Exposition de* 1900, 2e livraison (*les Chaudières*

(*) Bibliothèque de l'École nationale supérieure des Mines.

Digitized by Google

à vapeur pour l'industrie et la marine, par Ch. Bellens) et 1re livraison (*les Installations mécaniques de l'Exposition*, par G. Eude) ; *die Dampfkessel auf der Weltaustellung in Paris* 1900, par le professeur von Dœpp (*Protokollen des St-Petersburger Polytechnischen Vereins*, n° 8, 1900) ; L.-E. Bertin, *Chaudières marines* (2e édition, Paris, 1902) ; une communication de M. Walckenaer au Congrès international de Mécanique appliquée en 1900 (t. III, p. 41) sur *les Chaudières à tubes d'eau*, étudiées surtout au point de vue de la sécurité ; *les Chaudières à petits éléments, classification, rendement, fonctionnement*, par M. Brillié (*Congrès international de mécanique appliquée*, 1900, t. I, p. 387).

Chaudières à grands corps. — La chaudière à bouilleurs, généralement employée autrefois en France pour les installations fixes, se construit rarement aujourd'hui, ou du moins on en augmente la surface de chauffe par des tubes à fumée (générateurs dits *semi-tubulaires ;* voir ci-après).

Parmi les 151 chaudières exposées à Paris, en 1900, figurait une seule chaudière à bouilleurs, construite par Crépelle-Fontaine, et composée de deux corps cylindriques reliés par un réservoir de vapeur transversal, et portant chacun un bouilleur. Des *émulseurs* y étaient disposés pour faire circuler l'eau.

La chaudière à un foyer cylindrique intérieur (chaudière de Cornouailles), ou à deux foyers (chaudière de Lancashire), et même à trois foyers, se construit encore souvent, notamment en Angleterre, en Allemagne, en Russie. Pour les pressions élevées, on emploie parfois les foyers ondulés de la marine. L'Exposition de 1900 renfermait, dans la section russe, de tels générateurs d'une exécution extrêmement remarquable. Les *tubes Galloway*, placés dans les tubes foyers, augmentent la surface de chauffe.

A l'Exposition de 1900, la maison allemande Pauksch

Digitized by Google

et Cie avait présenté deux chaudières de Cornouailles accouplées avec carneau commun entre elles, pour une pression de 12 atmosphères. Avec une pression élevée, cette combinaison présente certains avantages sur la chaudière unique à deux foyers intérieurs.

La fabrique russe de Fitzner et Gamper avait exposé une chaudière de Lancashire fort bien construite, travaillant à 12 atmosphères, avec tubes d'eau cintrés présentant quelque analogie avec les tubes Galloway. Les foyers étaient construits en tôle ondulée, les ondulations étant obtenues en chauffant suivant un cercle une virole cylindrique remplie d'air comprimé à 6 atmosphères et soumise à l'action d'une presse hydraulique dirigée suivant son axe. Pour régulariser la chauffe circulaire, la virole reçoit un mouvement de rotation.

Les générateurs Galloway, fonctionnant à la pression de $10^{atm},5$, se retrouvent à l'Exposition avec leur disposition ancienne de deux foyers intérieurs prolongés par un conduit de forme aplatie, traversé par une série de tubes d'eau.

Comme exemple de chaudière à trois foyers intérieurs, on peut citer celle qu'avait exposée en 1900 E. Berninghaus, de Duisburg.

Chaudières à tubes de fumée. — La chaudière *tubulaire* ou à tubes de fumée continue à être seule employée pour les locomotives, qui ne sont pas étudiées dans la présente revue (*). Dans la marine, on a renoncé au type locomotive après l'avoir employé pour des torpilleurs. Comme générateur fixe, la chaudière type locomotive est quelquefois employée ; mais elle est un peu trop compliquée et

(*) Une chaudière de locomotive à tubes d'eau vient d'être proposée en Angleterre par M. Drummond, ingénieur du *London and South Western Ry*. (Voir *Revue de Mécanique*, décembre 1901, p. 705).

Digitized by Google

coûteuse pour cette application. Cette forme convient bien pour des locomobiles. Mais, pour cet emploi, surtout quand les dimensions sont un peu grandes, on préfère, en général, les chaudières cylindriques à foyer intérieur, avec tubes à la suite du foyer ou bien en retour.

Avec cette dernière disposition, les tubes étant fixés à une extrémité sur la chambre que prolonge le foyer, et, à l'autre, sur la tôle de façade de la chaudière, tout le système intérieur peut être relié seulement à cette tôle de façade. Cette tôle étant réunie à l'enveloppe extérieure par une couronne de boulons faciles à démonter, l'enlèvement du système intérieur, pour la visite et le nettoyage, est rendu facile. C'est la disposition de Thomas et Laurens, souvent encore imitée.

Comme grand générateur fixe, on emploie souvent en France la chaudière dite semi-tubulaire, construite notamment par Meunier, par la Cie de Fives-Lille, composée d'un corps cylindrique traversé par les tubes, et de deux bouilleurs placés au-dessus de la grille. On obtient ainsi une grande surface de chauffe sans dimensions excessives.

Les courts-circuits du foyer à la cheminée et les rentrées d'air peuvent encore se produire avec ce type de chaudière.

La *fig.* 56 est une chaudière à foyer intérieur, avec tubes dans le prolongement, chauffée au gaz de haut fourneau.

Dans le type représenté *fig.* 57, le foyer intérieur est supprimé.

La disposition allemande de Tischbein, peu connue en France, était présentée à l'Exposition de 1900 par les constructeurs Berninghaus et Petzold : elle se compose d'une chaudière à foyers cylindriques intérieurs surmontée d'un corps tubulaire, la chaudière inférieure et le corps supérieur ayant souvent des plans d'eau séparés. La vapeur produite dans la chaudière inférieure est ame-

Digitized by Google

née dans le corps supérieur par un tuyau qui en traverse

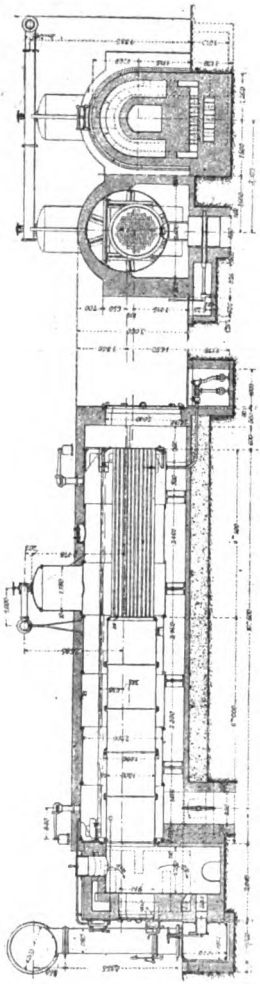


Fig. 56. — Chaudière du *Creusot* chauffée par les gaz de haut-fourneau (*Revue de Mécanique*, 1898, 1er sem., p. 210).

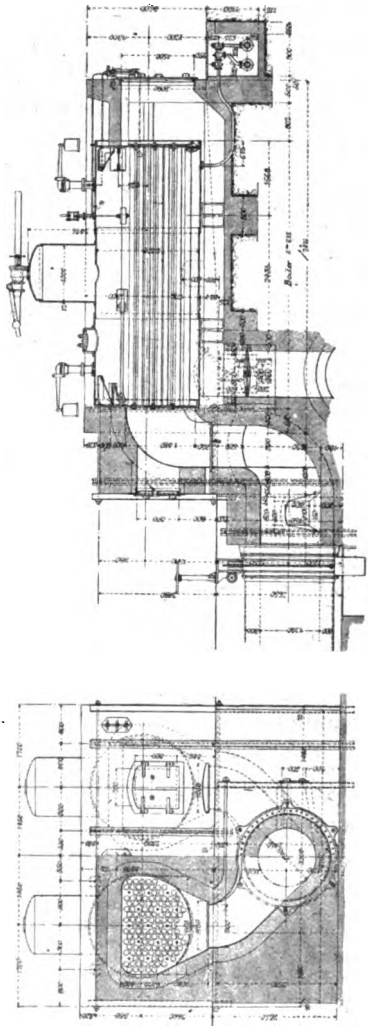


Fig. 57. — Chaudière du *Creusot* pour fours à coke (*Revue de Mécanique*, 1898, 1er sem., p. 212).

la masse d'eau, tandis que l'eau coule du corps supérieur, où se fait l'alimentation, dans le corps inférieur, par un

Digitized by Google

tuyau qui affleure le plan d'eau supérieur. On peut dire que le corps supérieur agit en grande partie comme réchauffeur.

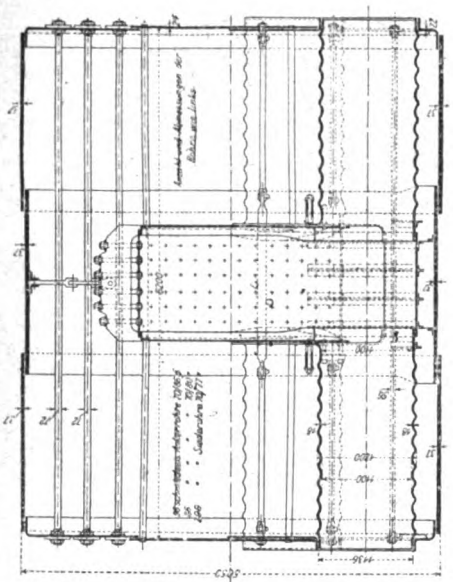
Dans la marine, la chaudière cylindrique à foyers intérieurs avec tubes en retour, dite souvent *chaudière écossaise*, continue à être largement appliquée. Elle est considérée comme la plus sûre et la plus commode, et on la préfère encore généralement lorsque le poids et l'enroulement admissibles le permettent. Même avec de grands diamètres, cette chaudière se construit pour de hautes pressions. Par exemple, les chaudières du *Deutschland* (*fig.* 58 et 59) ont un diamètre de $5^m,050$; l'épaisseur de l'enveloppe est de 37 mm et le timbre de 15 kg; cela correspond à un effort d'un peu plus de 10 kg par mm^2 dans la tôle. On ne pourrait guère obtenir, avec ce type de chaudière, les pressions extrêmement élevées, atteignant 20 kg par cm^2, qu'on commence à employer aujourd'hui.

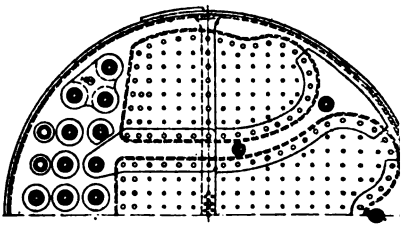
La chaudière renferme quelquefois quatre foyers cylindriques, le plus souvent trois, parfois deux et même un seul; ces foyers débouchent dans des chambres de combustion, ou boîtes à feu, dont les faces latérales sont entretoisées entre elles et avec l'enveloppe extérieure; parfois les parois voisines des différentes boîtes à feu sont supprimées, tous les foyers débouchant dans une boîte unique. Le ciel horizontal est raidi par des armatures ou maintenu par des tirants. Des boîtes à feu partent des tubes en retour, placés au-dessus des foyers et débouchant dans une boîte à fumée rapportée contre la façade. Le nombre des foyers est justifié par la préférence qu'on donne aux diamètres modérés, compris entre $0^m,90$ et $1^m,20$.

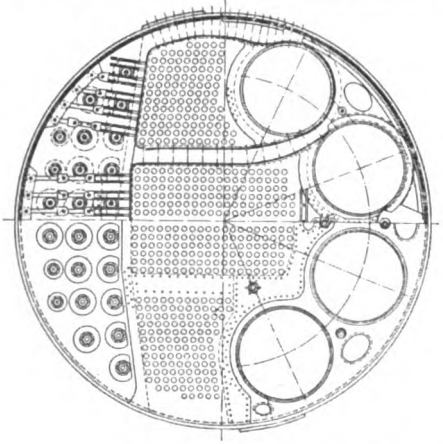
Les chaudières à double façade dérivent de deux chaudières pareilles accolées dos à dos, dans lesquelles on a supprimé les deux fonds contigus, qui deviennent inutiles.

Digitized by Google

On peut également supprimer les parois parallèles voisines des chambres de combustion, une même chambre servant







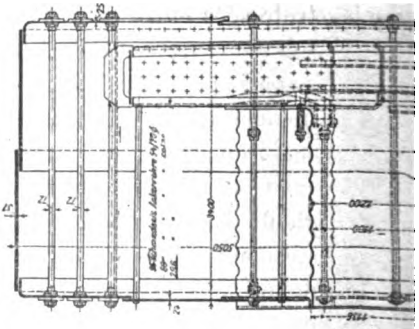


Fig. 58 et 59. — Chaudière simple et chaudière double du paquebot *Deutschland*.

à deux foyers opposés. L'économie de poids et d'emplacement est importante. La distance entre les deux fonds

Digitized by Google

plats étant plus grande, la fatigue de l'enveloppe cylindrique peut être un peu plus grande.

Comme exemples de constructions récentes de ces types de chaudières, les *fig.* 58 et 59 représentent les chaudières à quatre foyers, type simple et type double, du paquebot *Deutschland.*

Le montage des tubes à fumée se fait généralement par mandrinage ou dudgeonnage (*) dans des trous légèrement coniques vers l'extérieur des plaques. La conicité correspond à celle de la broche du dudgeon. On peut aussi monter les tubes dans les trous cylindriques, en employant des galets coniques qui compensent la conicité de la broche centrale.

Souvent on complète l'assemblage en rabattant la portion du tube qui dépasse la plaque, à l'extérieur. Enfin, l'addition de *viroles* ou *bagues* consolide le montage, et permet de resserrer les tubes si des fuites se produisent. La conicité des trous est utile pour le bon fonctionnement des viroles. Les bagues ont le défaut de réduire la section de passage des gaz à l'extrémité des tubes; mais il est souvent assez difficile de s'en passer pour les assemblages fortement chauffés. Quelquefois on a disposé la virole de sorte qu'elle forme vers l'extérieur une sorte de chapeau, protégeant l'extrémité du tube contre l'action trop vive des flammes.

Pour augmenter la surface de chauffe des tubes, on les munit d'ailettes intérieures : tels sont les tubes *Serve.* Il convient que le diamètre de ces tubes ne soit pas trop petit, et ne descende pas au-dessous de 60 ou 70 mm : autrement ils s'obstrueraient trop facilement. Certaines expériences sur les locomotives montrent que la surface

(*) Le *dudgeon*, ainsi désigné par le nom du constructeur anglais de cet appareil, est un mandrin où une broche légèrement conique écarte et fait tourner des galets en acier qui laminent le tube contre la plaque tubulaire.

Digitized by Google

de chauffe intérieure, comptée suivant le développement des ailettes, est à peu près aussi efficace qu'une même surface de tubes lisses.

Chaudières à tubes d'eau. — Les chaudières à tubes d'eau sont très fréquemment employées dans les installations fixes, et sur mer, par les marines militaires ; pour les bâtiments de commerce, c'est encore la chaudière dite écossaise qu'on préfère généralement. Les chaudières à tubes d'eau étaient en grande majorité à l'Exposition de Paris, en 1900.

La chaudière Belleville continue à être souvent appliquée. Dans la marine, elle est habituellement surmontée d'un réchauffeur qui abaisse la température des gaz rejetés dans la cheminée (*). Elle se range dans la catégorie des chaudières à *circulation limitée*, car il semble que l'eau qui pénètre dans les tubes chauffés s'y vaporise à peu près en totalité. La solidité et la bonne construction de cette chaudière en rendent l'emploi assez commode. Ainsi que dans toutes les chaudières à tubes d'eau, les tubes sont parfois exposés à une détérioration assez rapide, surtout dans le service à la mer (**).

Dans les autres chaudières à gros tubes rectilignes, les différents tubes sont parcourus par des courants parallèles au lieu de former des serpentins, comme dans le générateur Belleville ; ils sont aussi généralement plus longs que dans ce générateur, où les tubes sont tout entiers au-dessus de la grille. Les diverses chaudières de

(*) On trouvera dans le *Bulletin de la Société d'encouragement*, année 1899, p. 1370 et 1483, des exemples d'installations de chaudières Belleville sur des bateaux.

(**) L'emploi très étendu de la chaudière Belleville par la marine britannique a donné lieu récemment à des discussions prolongées dans la presse technique anglaise. Voir notamment *Engineering* (1901, 1er sem., p. 341, et 2e sem., p. 121, etc.) et *The Engineer* (1901, 1er sem., p. 673; 2e sem., p. 70, 231, etc., etc.).

Digitized by Google

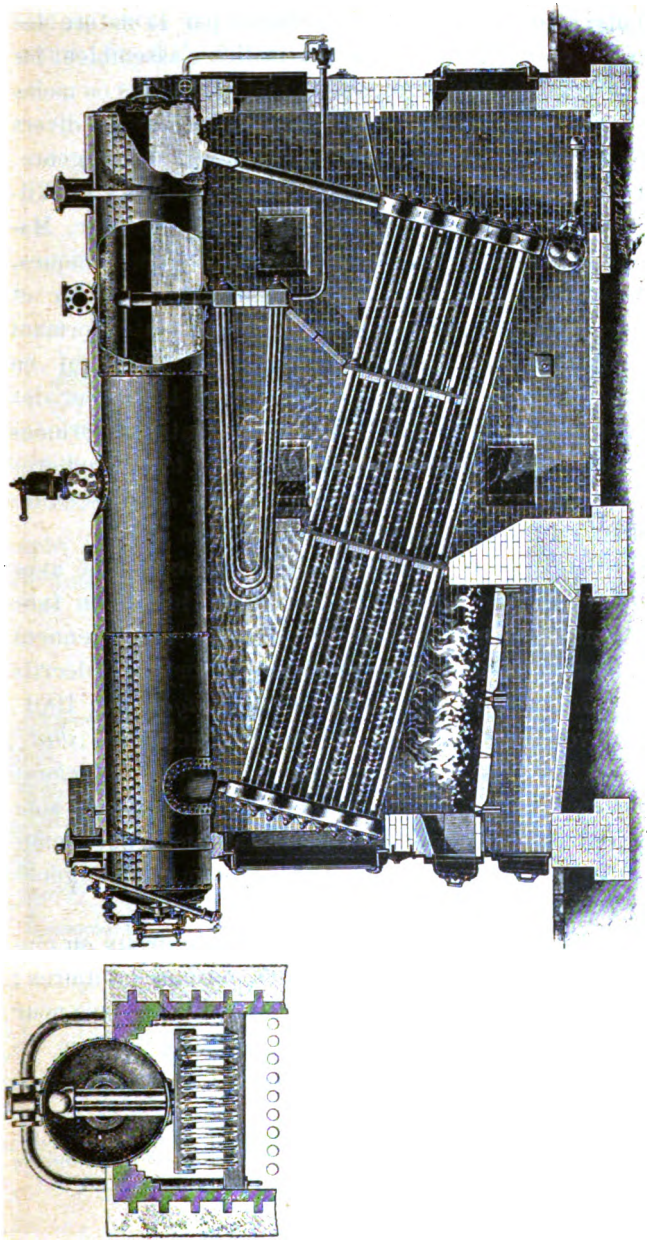


Fig. 60. — Chaudière Babcock et Wilcox, avec surchauffeur (d'après la *Revue de Mécanique*, mai 1899, p. 538).

Digitized by Google

ce genre sont, en outre, caractérisées par la nature des pièces de communication, sur lesquelles s'assemblent les deux extrémités des tubes, par la dimension plus ou moins grande du corps cylindrique supérieur et par les divers détails de construction. Parmi les appareils de ce genre, on peut citer les générateurs de Næyer, Babcock et Wilcox (*fig.* 60), Roser ; dans les générateurs Büttner, Mathot, de la Société française de constructions mécaniques, Pétry-Dereux, Simonis et Lanz, Steinmüller, Fitzner et Gamper, les tubes réunissent deux caisses plates formant lames d'eau. Cette disposition paraît actuellement en faveur ; elle permet d'offrir à l'eau et à la vapeur des passages plus grands que les communications formées d'assemblages de pièces multiples. Dans les chaudières Bary, les tubes, réunis par groupes de 19, sont asemblés aux deux extrémités sur deux tambours en tôle (*).

Les chaudières à tubes fermés à une extrémité avec tube intérieur pour diriger la circulation, imités du tube Field, sont assez nombreuses. A ce genre appartiennent les générateurs Collet, Dürr, Niclausse, Montupet (décrits dans le *Bulletin de la Société d'encouragement*, 1901, p. 317; voir aussi, sur le générateur Niclausse, *ibid.*, 1899, p. 169), le générateur de la *Société des chaudronneries du Nord de la France*. Ces générateurs sont employés non seulement dans les installations fixes, mais largement par les marines militaires, notamment le générateur Niclausse.

Les générateurs à petits tubes de fumée droits ou cintrés ont été créés pour les besoins des marines militaires ; ils ont été employés d'abord pour les torpilleurs, puis pour de grands bâtiments. On les désigne sous le nom de *chaudières express*. Quelques applications en ont été

(*) Voir Bellens, *Chaudières à vapeur pour l'industrie et la marine* (dans *la Mécanique à l'Exposition de* 1900, 2e livraison, p. 60).

Digitized by Google

faites à terre. A ce genre appartiennent les chaudières Yarrow (*fig.* 61), Normand, Thornycroft (*fig.* 62), Du-

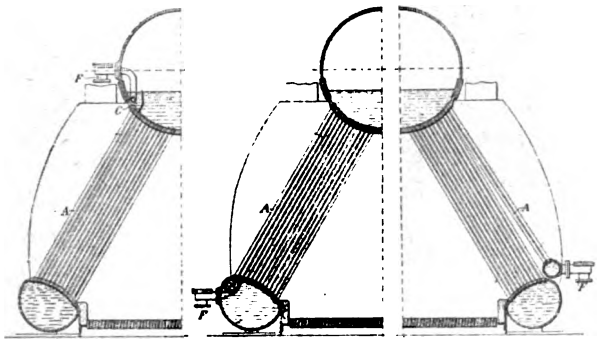


Fig. 61. — Chaudière Yarrow (d'après la *Revue de Mécanique*, juin 1898, p. 642).

temple (*fig.* 63). Ces générateurs se composent d'un collecteur supérieur et de deux collecteurs inférieurs,

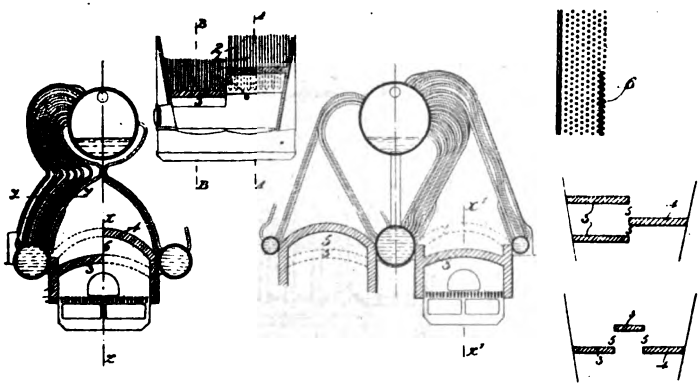


Fig. 62. — Chaudières Thornycroft, à une grille et à deux grilles ; coupes *x-x*, *y-y*, *x'-x'*, A-A, et B-B (d'après la *Revue de Mécanique*, janvier 1898, p. 102).

réunis par les tubes chauffés, et aussi par de gros tubes de retour soustraits à l'action du foyer. Dans la chau-

Digitized by Google

dière de Thornycroft, les tubes chauffés débouchent au-dessus du plan d'eau, dans le collecteur supérieur.

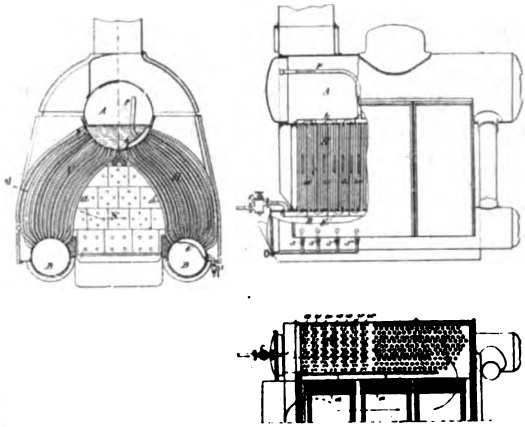


Fig. 63. — Chaudière Dutemple (d'après la *Revue de Mécanique*, février 1898, p. 209).

Chaudières mixtes. — Les chaudières Meunier et Tisch-

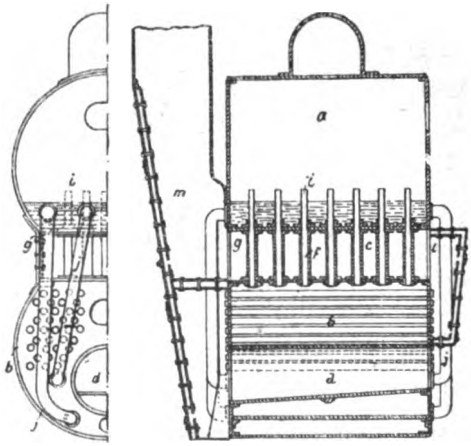


Fig. 64. — Chaudière mixte Mac-Donald (d'après la *Revue de Mécanique*, février 1898, p. 210).

bein, décrites dans le paragraphe des générateurs tubu-

Digitized by Google

laires, rentreraient plus exactement dans la catégorie des générateurs mixtes. La chaudière Mac Donald (*fig.* 64) présente des tubes à fumée, parcourus par les gaz à la sortie du foyer, et des tubes d'eau, placés sur le parcours ultérieur des gaz.

On peut encore citer certaines chaudières où de gros tubes d'eau sont traversés par des tubes à fumée concentriques.

Circulation de l'eau dans les chaudières. — La circulation de l'eau dans les chaudières, surtout dans les chaudières à tubes d'eau, est d'une grande importance. Les dispositions qui assurent une circulation active, de sorte qu'un excès d'eau accompagne la vapeur formée et rafraîchisse constamment les surfaces métalliques, ont évidemment un grand intérêt ; mais ces dispositions sont loin d'être complètement réalisées dans tous les types de chaudières.

Depuis quelques années, la question a été l'objet de plusieurs études théoriques et expérimentales. On peut citer notamment une série d'articles dans le journal *the Engineer*, année 1896, des travaux de M. Brillié dans *le Génie civil* (décembre 1897 à octobre 1899) et dans sa communication précitée au Congrès de Mécanique appliquée en 1900, de M. Walckenaer dans la *Revue de Mécanique* (février 1897, p. 143), de M. Chasseloup-Laubat dans le *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils de France* (avril 1897), de M. Bellens dans son *Traité des chaudières à vapeur* et dans la *Revue de Mécanique* (en novembre 1899, p. 484).

M. Brüll a étudié expérimentalement la circulation à l'aide d'une sorte de tube de Pitot engagé dans la chaudière, (*Revue de Mécanique*, janvier 1902, p. 66). Dans le type de chaudière qu'il a essayé, il a trouvé que la circulation était irrégulière et variait beaucoup avec l'activité du feu.

Digitized by Google

Des tubes verticaux, de diamètre assez petit pour que les bulles de vapeur les remplissent complètement, en séparant des tronçons de colonnes liquides, provoquent une circulation active ; de tels tubes sont employés dans l'émulseur Dubiau (*fig.* 65), qui s'applique à différents types de chaudières.

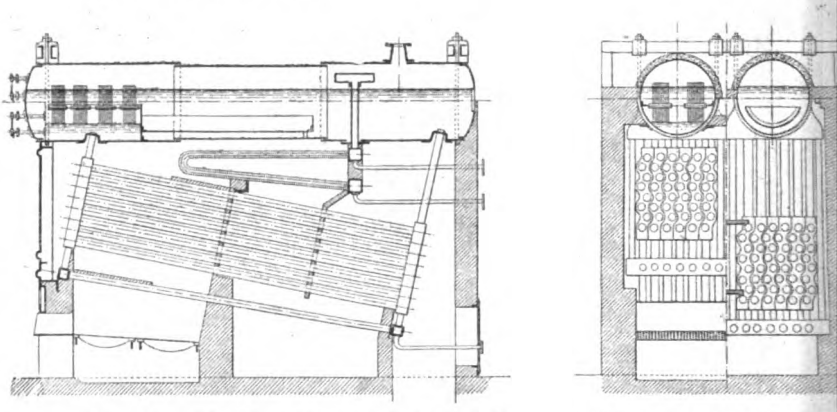


Fig. 65. — Emulseur Dubiau, dans une chaudière Babcock et Wilcox (d'après la *Revue de Mécanique*, janvier 1900, p. 97).

Une circulation insuffisante réduit la production de vapeur et expose les tôles ou les tubes à des avaries par surchauffe.

Grilles, foyers. — Les grilles spécialement disposées pour brûler des combustibles menus et de qualité inférieure, comme les escarbilles qui s'accumulent dans la boîte à fumée des locomotives, ont un certain intérêt, et sont assez souvent appliquées. Ces grilles n'ont que de petites ouvertures, et elles comportent souvent une insufflation d'air par jets de vapeur ou par ventilateur. On peut citer entre autres les foyers Kudlicz et Meldrum.

Le tirage forcé par aspiration, mais sans qu'on cherche à obtenir des combustions très actives, reçoit quelques

Digitized by Google

applications. Le système Pratt consiste en une *trompe* (*fig.* 66) alimentée par un ventilateur : moyennant une faible dépense de puissance motrice, il permet de substituer à une grande cheminée en briques une cheminée en tôle beaucoup plus petite.

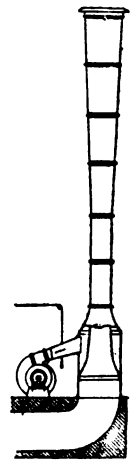


Fig. 66. Tirage par aspiration Pratt (Voir *le Génie civil* du 29 janv. 1898, p. 213).

Dans la marine, le tirage par aspiration d'un ventilateur que traversent les gaz chauds a été assez souvent appliqué depuis quelques années : c'est ce qu'on appelle le tirage induit.

Une disposition d'un grand intérêt consiste à échauffer l'air destiné à la combustion aux dépens de la chaleur perdue des gaz de la combustion. Au point de vue de l'économie de combustible, il importe que les gaz soient rejetés à une température aussi basse que possible : déjà le chauffage méthodique de l'eau, c'est-à-dire l'emploi de réchauffeurs d'eau d'alimentation, est un moyen pour abaisser la température des gaz plus qu'à l'aide d'une même surface totale de chaudière proprement dite. Pour chauffer l'air, il suffit de surfaces métalliques très minces, parce qu'elles n'ont pas de pression à supporter ; ces surfaces paraissent d'ailleurs souvent plus efficaces que ne l'indiquent les coefficients ordinairement admis pour la transmission des calories, coefficients d'ailleurs peu précis.

Sous réserve des difficultés pratiques qui pourraient provenir de l'emploi de l'air très chaud, il semble qu'il y aurait économie, surtout au point de vue du poids total des appareils, à réduire la surface de la chaudière et des réchauffeurs en développant suffisamment la surface de chauffe de l'air.

En pratique, les systèmes Howden et Ellis, appliqués dans la marine, ont procuré une certaine économie de

Digitized by Google

combustible. Dans le système Howden, l'air est refoulé par un ventilateur dans les cendriers, après s'être chauffé. Dans l'appareil Ellis, l'air est appelé à travers l'appareil réchauffeur, le foyer et la chaudière, par un ventilateur aspirant, produisant le tirage induit.

La *fig.* 67 représente le réchauffeur d'air *Fraser*, appliqué à un générateur fixe.

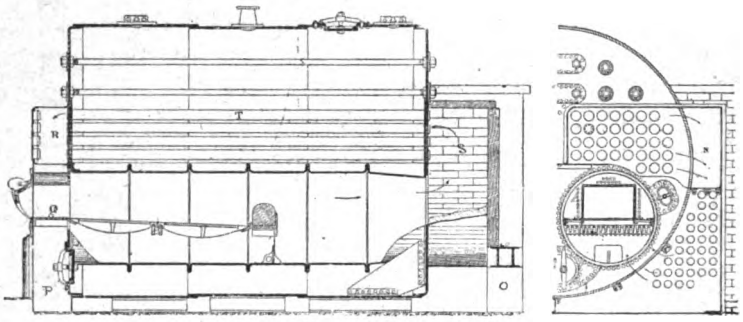


Fig. 67. — Réchauffeur d'air Fraser
(d'après la *Revue industrielle*, 29 janvier 1898, p. 44).

Dans la plupart des chaudières fixes, les gaz chauds circulent, au moins pendant une partie de leur trajet, dans des carneaux ou contre des enveloppes extérieures en briques. Les fissures des maçonneries peuvent donner lieu à des pertes de gaz chauds, ou à des *courts-circuits* se rendant directement à la cheminée. En outre, il se produit fréquemment des rentrées d'air importantes, air qui vient inutilement s'échauffer aux dépens des produits de la combustion. Ces inconvénients existent surtout dans les chaudières à foyer extérieur. Ces rentrées d'air ont été signalées par M. Schmidt, directeur de l'Association des Propriétaires d'appareils à vapeur de la Somme et de l'Oise.

Chargement mécanique du combustible. — On trouve aux États-Unis et en Angleterre des exemples de distribution

Digitized by Google

mécanique du combustible, notamment dans des batteries d'un grand nombre de chaudières. En France, ces appareils ne sont pas très répandus, et ne paraissent pas entrés dans la pratique courante. En regard des services évidents qu'ils rendent, il faut considérer les dépenses d'installation et d'entretien qu'ils exigent. On leur reproche aussi, d'une manière générale, de ne pas bien se prêter à des allures de marche très variables. Il semble cependant que la question soit assez importante pour qu'on s'en occupe plus qu'on ne le fait. A titre d'exemple d'appareil de chargement assez simple, applicable à des chaudières isolées, on peut citer celui de Dulac, décrit dans le *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (année 1894, p. 326).

On a repris depuis quelques années un procédé ingénieux, qui avait été autrefois essayé par M. Crampton, la pulvérisation préalable du charbon : le charbon réduit en poudre fine brûle à peu près comme un jet de gaz. Parmi les appareils employant ainsi le charbon pulvérisé, on peut citer ceux de Wegener (*Revue de Mécanique*, juin 1898, p. 625) et de Schwartzkopff.

Dans les batteries de plusieurs chaudières, il convient de prévoir des dispositions pour l'enlèvement facile des résidus de la combustion.

Fumivorité. — La suppression des fumées n'a pas encore été réalisée d'une manière bien satisfaisante, et beaucoup d'industriels sont encore enclins à penser que, pour produire peu de fumée, il faut faire charger des charbons peu fumeux par des chauffeurs soigneux. Cependant, à la suite d'un très important concours organisé par la Ville de Paris, la Commission chargée du concours a pu déclarer qu'il existait des procédés efficaces pour atténuer, dans une large mesure, l'intensité des fumées industrielles, et que ces procédés étaient d'un usage pra-

Digitized by Google

tique, bien qu'aucun des nombreux appareils essayés n'ait donné des résultats complètement satisfaisants.

La *Revue de Mécanique* (*) a publié le compte rendu, par M. Hirsch, de ce concours ; ce compte rendu décrit un grand nombre d'appareils, ainsi que les essais auxquels ils ont été soumis. Il indique un procédé fort simple pour l'appréciation des fumées, classées en cinq catégories. Un tableau résumant les principaux essais de la Commission a été dressé par M. Bryan Donkin (Voir *Revue de Mécanique*, décembre 1898, p. 663). Le même auteur a publié dans le journal *the Engineer* (1901, 1er sem.) un intéressant résumé de la question de la fumivorité (**).

Surchauffeurs. — Les appareils pour surchauffer la vapeur sont quelquefois installés à côté des machines, avec un foyer spécial. Cette disposition peut évidemment avoir quelque avantage quand les moteurs sont fort éloignés des chaudières ; mais l'addition d'une chauffe spéciale est une bien grande sujétion. Le plus souvent, le surchauffeur fait corps avec le générateur de vapeur. Parfois il est chauffé par les chaleurs perdues des gaz, à la suite de la chaudière proprement dite ; mais cette disposition est critiquable, puisqu'on place en contact avec les gaz les moins chauds l'appareil où la vapeur doit atteindre la température la plus élevée. En principe, il convient que le surchauffeur soit entouré de gaz encore bien chauds, sans toutefois que la température en soit assez élevée pour le détériorer.

On trouvera de nombreux détails sur ces appareils dans l'étude importante sur la surchauffe que M. Sini-

(*) 1898, 1er sem., p. 337 et 605 ; 2e sem., p. 283 et 648.

(**) Ce résumé a été réimprimé en une brochure spéciale (Bibliothèques de l'École nat. supérieure des Mines, du Conservatoire des Arts et Métiers).

Digitized by Google

gaglia a publiée dans la *Revue de Mécanique* (*) et dans un travail tout récent de M. Abraham, dans les *Annales des Mines* (juillet 1901, p. 59). La chaudière Babcock et Wilcox, représentée *fig.* 60, est munie d'un surchauffeur.

Tuyauteries. — Surtout quand elles desservent d'importantes batteries de chaudières, et spécialement à bord des navires, les tuyauteries demandent à être étudiées et exécutées avec grand soin, car la rupture d'un tuyau est fort dangereuse et a parfois causé de terribles catastrophes.

On trouvera dans la *Revue de Mécanique* (avril 1899, p. 416) l'analyse d'une note de M. Milton sur les tuyauteries des machines marines : l'auteur y préconise l'emploi du fer ou de l'acier doux de préférence au cuivre. Le *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (mai 1898, p. 633) donne d'intéressants détails sur l'altération de la brasure des tuyaux. On trouvera dans la *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure* (27 octobre 1900) les règles tracées pour les tuyauteries de vapeur par l'Association des Ingénieurs allemands (**).

Alimentation. — L'alimentation des chaudières est souvent assurée par des petits chevaux, auxquels s'applique trop souvent l'observation faite relativement aux moteurs des condenseurs indépendants : ces moteurs consomment une quantité exagérée de vapeur. Les injecteurs sont, dans bien des cas, plus avantageux; mais il faut remarquer qu'ils ne donnent toute leur économie que si l'eau d'alimentation est refoulée dans une chaudière propre-

(*) Année 1897, p. 213, 333, 536, 721, 941, 1136; année 1898, 1er sem., p. 43, 233, 445.

(**) *Le Génie civil* en a donné un résumé (numéro du 15 décembre 1900, p. 112).

Digitized by Google

ment dite, non munie de réchauffeur : en effet, l'injecteur consomme beaucoup de vapeur ; mais cette vapeur échauffe l'eau d'alimentation : dans une chaudière sans réchauffeur, il n'en résulte aucune perte, et il est même préférable, au point de vue de la conservation des tôles, d'introduire l'eau déjà chaude dans la chaudière. Mais on dépense moins de combustible en échauffant l'eau dans un réchauffeur à l'aide de la chaleur perdue. En outre, pour qu'on puisse se servir de l'injecteur, l'eau d'alimentation doit être froide ou, du moins, ne pas être à une température de plus de 40 à 50°. L'injecteur empêche donc le réchauffage préalable de l'eau à l'aide de la vapeur d'échappement des machines sans condensation.

Bien que les injecteurs soient presque toujours exécutés en série par des constructeurs spéciaux, il n'en existe pas moins un très grand nombre de types différents. On construit aujourd'hui des appareils, un peu compliqués peut-être, mais d'une manœuvre extrêmement facile, et refoulant l'eau à des pressions très élevées, tels que ceux de Sellers, de Friedmann (*fig.* 68).

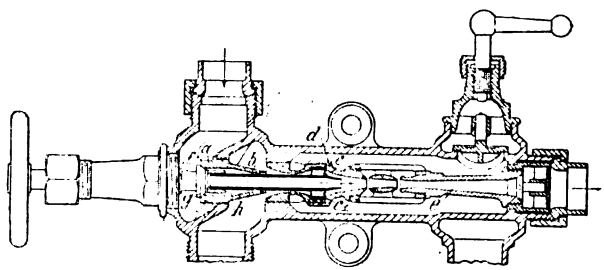


Fig. 68. — Injecteur Friedmann (d'après la *Revue de Mécanique*, décembre 1898, p. 683).

L'injecteur à vapeur d'échappement, connu depuis longtemps, continue à recevoir quelques applications, mais sans que l'emploi s'en répande beaucoup. Cela tient sans

Digitized by Google

doute à ce que la manœuvre de l'appareil est un peu moins simple que celle de certains injecteurs ordinaires, et à ce que la vapeur d'échappement seule ne suffit pas

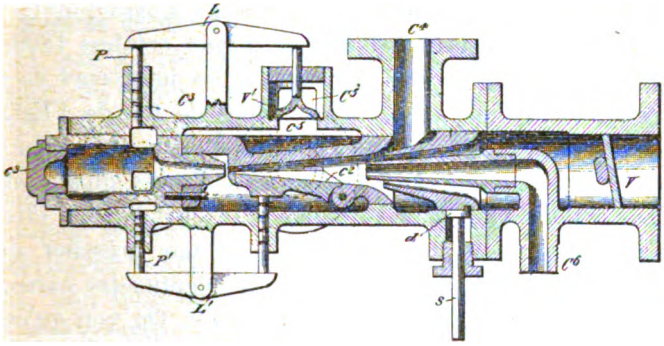


Fig. 69. — Injecteur à vapeur d'échappement Metcalfe.

dès que la pression dépasse 4 ou 5 kilogrammes par centimètre carré, ce qui est le cas de presque toutes les

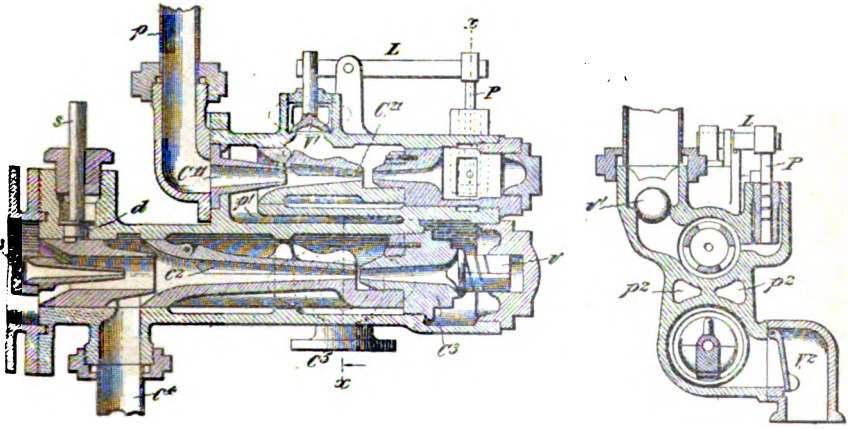


Fig. 70. — Injecteur à vapeur d'échappement Metcalfe, double (d'après la *Revue de Mécanique*, juin 1900, p. 747).

chaudières. Les *fig.* 69 et 70 représentent deux types de ces appareils.

Digitized by Google

Le *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* a publié (février 1900, p. 297) la description d'un appareil pour l'essai des injecteurs, installé au Laboratoire de l'Institut technologique du Massachusetts. On trouvera dans la *Revue de Mécanique* (octobre 1899, p. 366) une note de M. Desgeans sur les injecteurs employés par la Compagnie des chemins de fer de l'Est, donnant de très intéressants résultats d'essai. On remarquera notamment la température très élevée qu'atteint dans certains cas l'eau refoulée à la chaudière. Cette température monte jusqu'à 124°, pour une pression au refoulement de 15 kilogrammes par centimètre carré, quand l'eau d'alimentation est prise à 45°. On voit qu'on peut dépasser de beaucoup la limite de 85° parfois indiquée pour les injecteurs Giffard.

Les tuyaux d'alimentation des chaudières débouchent le plus souvent au-dessous du niveau de l'eau. Mais, depuis quelques années, on applique de plus en plus la disposition qui consiste à envoyer l'eau d'alimentation dans la vapeur. Cette disposition paraît de nature à diminuer la corrosion des tôles. Une circulaire du Ministre de la Marine, du 7 juillet 1891, l'a rendue réglementaire. Elle a l'inconvénient de donner lieu fréquemment à des chocs dans les tuyaux : la question a été étudiée en détail dans les *Annales des Mines* (9e série, t. XII, p. 513 et 533), par MM. Moritz et Raymond.

Appareils divers. — M. Rateau a étudié un intéressant *accumulateur-régénérateur* pour emmagasiner les vapeurs d'échappement de moteurs à marche intermittente, tels que les machines d'extraction des mines. Les vapeurs d'échappement, à la pression voisine de celle de l'atmosphère, se rendent dans un récipient contenant des masses métalliques convenablement divisées, qui permettent d'emmagasiner une grande quantité de calories.

Digitized by Google

Ce réservoir est destiné à alimenter un moteur à condensation, de préférence une turbine à vapeur.

Mesures de sécurité. — La sécurité est garantie, d'une part, par les soins apportés à l'étude des chaudières, au choix des matériaux et au travail d'exécution, et, d'autre part, par une surveillance efficace, comprenant des visites extérieures et intérieures à intervalles suffisamment rapprochés. Les Associations de Propriétaires d'appareils à vapeur assurent ces visites et, d'une manière générale, contrôlent le fonctionnement des appareils d'une manière qui, non seulement diminue les risques d'accident, mais encore contribue à des améliorations avantageuses au point de vue de l'économie.

Le Congrès international de Surveillance et de Sécurité en matière d'appareils à vapeur, tenu à Paris en 1900, a étudié une série de questions relatives à la surveillance, réglementée et libre, des appareils, à l'établissement et à la construction des chaudières et des tuyauteries, à l'hygiène et à la sécurité des chaufferies, à l'épuration des eaux, aux corrosions. Sous le titre d'*Accidents aux chaudières à vapeur*, M. Sinigaglia a publié dans la *Revue de Mécanique*, en 1899 et 1900, une importante étude sur la résistance des diverses parties des générateurs et sur la qualité des matériaux à employer.

(*A suivre.*)

Digitized by Google

BULLETIN.

SERVICE DES LOCOMOTIVES PAR ÉQUIPES BANALES

Par M. GILNICKI, Elève à l'École Nationale supérieure des Mines (*).

Le service des locomotives est une question des plus intéressantes dans l'exploitation des chemins de fer. Savoir si les équipes banales sont oui ou non préférables aux équipes spéciales est un point qui continue à diviser les ingénieurs européens. Les opinions émises sont assez diverses; c'est pourquoi nous avons pensé qu'il ne serait pas sans intérêt de résumer l'avis de quelques ingénieurs américains, qui ont récemment discuté la question.

Dans la réunion du *North West Railway Club* de septembre 1901, M. Van Alstine, du *Chicago Great Western*, fait un examen détaillé du service banal. Pour cet examen, dit-il, on peut se placer à trois points de vue : la commodité, le rendement, et les dépenses qu'il occasionne.

Pour ce qui regarde la commodité, M. Van Alstine pense que les équipes banales sont de beaucoup supérieures aux équipes spéciales, en ce sens que les mécaniciens prennent leur service sans qu'on ait à leur confier de locomotive spéciale. La machine qui est prête la première sort, pourvu qu'elle soit d'une catégorie convenable, et, de plus, pendant les périodes de fort trafic, on peut parcourir plus de kilomètres avec le même nombre de locomotives en employant des équipes supplémentaires.

Quant au maintien du bon état du matériel, il semble tout naturel qu'il y ait plus d'avaries de machines avec les équipes banales qu'avec les équipes attachées à une locomotive. Bien

(*) D'après la *Railroad Gazette* du 25 octobre 1901. Voir, dans les *Annales des Mines*, une note de M. E. Sauvage sur le même sujet (8e série, t XIX, p. 649).

Digitized by Google

que l'on admette que les visites des machines marchant en service banal, faites par des inspecteurs qui examinent les locomotives au dépôt, soient exécutées aussi soigneusement que par des mécaniciens (et M. Van Alstine déclare n'avoir aucun doute à cet égard), il y a dans les locomotives des défauts cachés que seuls les hommes qui les conduisent peuvent découvrir. Les mécaniciens ne s'intéressent pas, à beaucoup près, autant à leur machine dans le service banal que dans le service par équipes régulières ; dans ces conditions, on ne voit pas comment on pourrait éviter d'avoir plus d'ennuis avec les équipes banales. Toutefois, avec des conditions favorables de charge des trains, une double voie, de la bonne eau et du bon charbon, les deux systèmes se valent à peu près.

Pour ce qui est des frais, la surveillance, c'est-à-dire la dépense occasionnée par les contremaîtres et les chefs mécaniciens, est, sans aucun doute, supérieure avec le service par équipes banales. Mais la surveillance est un petit facteur dans la dépense totale. En huile, en approvisionnements, en torchons, M. Van Alstine doute qu'il y ait une augmentation sensible. Comme main-d'œuvre, il y a un petit supplément du fait des inspecteurs, et des hommes qui remplissent et nettoient les fanaux ; cela amène un petit supplément au rôle de paye, mais ce supplément est difficilement appréciable. Pour ce qui est des réparations, on n'a jamais pu établir qu'il y ait plus de dépenses pour l'entretien des machines en service banal qu'en service régulier. La locomotive conduite par équipes banales fait en moyenne assez de milles pour que le taux des réparations par mille parcouru soit diminué. D'après son expérience, M. Van Alstine ne croit pas que les réparations par mille augmentent ; au contraire, il incline plutôt à penser que ces réparations décroissent et, autant qu'il a pu en juger, les machines en service banal parcourent à peu près la même distance, entre deux visites générales pour réparations, que les machines à équipes spéciales.

M. Van Alstine n'a pu recueillir que peu d'informations quant à la consommation de combustible, toutefois ces informations l'ont conduit à penser qu'il y a une différence d'à peu près 5 p. 100 en faveur des locomotives à équipes spéciales. Il estime que cette différence est plausible, et il croit qu'elle existe réellement. Mais, même en admettant cette différence de 5 p. 100 sur la dépense de charbon, si on considère que les locomotives peuvent parcourir une distance plus longue de 50 p. 100 avec les équipes banales, l'intérêt du coût d'acquisition de machines supplémen-

Digitized by Google

taires, pour permettre d'en donner une à chaque mécanicien, ferait plus que compenser l'économie de combustible.

M. Van Alstine conclut en ces termes: « Si je me place au point de vue d'un ingénieur de traction, qui désirerait avant tout la tranquillité et la facilité du service, je préfèrerais que chaque mécanicien eût sa machine. Mais, pour un directeur qui regarde de près les dépenses, il suffit d'avoir assez de locomotives pour faire le service quand ce dernier est le plus intensif. »

M. John Tonge dit ensuite que, sur le réseau du *Minneapolis and St. Louis*, auquel il appartient, on a employé depuis un peu plus de trois ans des locomotives conduites par équipes banales ; pour ce qui regarde les avaries de toutes sortes, on ne peut pas dire, déclare-t-il, qu'il y en ait eu plus avec les équipes banales qu'avec les autres ; et, quant à lui, il ne croit pas que les retards ou les détresses soient plus nombreux avec le service banal qu'avec le service régulier.

M. A. Level, du *Northern Pacific*, prend ensuite la parole. Il déclare que, sur ce réseau, on emploie quelque peu le service banal par nécessité. Mais il ne croit pas que, s'il avait à choisir, il prendrait ce genre de service. La plupart des lignes ne possèdent que le nombre de locomotives nécessaires pendant l'époque de fort trafic, époque durant laquelle toutes les machines doivent être mises en service. Mais, quand le trafic se ralentit, il ne paraît y avoir aucune nécessité à maintenir les équipes banales. Quand ce système est en vigueur, certaines locomotives sont maintenues constamment en service ; il y en a, par contre, d'autres qui ne circulent pas du tout ; cela n'est pas bon. Il est évident qu'il est préférable, dans ce dernier cas, d'avoir des hommes régulièrement attachés à la même locomotive, faisant chacun une partie du service avec leur machine, plutôt que d'avoir un certain nombre de ces machines mises de côté et ne servant pas.

Des conditions locales peuvent changer beaucoup les règles à adopter.

Par exemple, si l'on est dans une région où l'eau est très mauvaise, les chaudières doivent être lavées souvent, après chaque voyage aller et retour : avec les grandes machines qui sont en service sur quelques lignes, il faut bien huit à dix heures pour faire échapper la vapeur, refroidir la chaudière, en vider l'eau et ral-

Digitized by Google

lumer le feu; et tout mécanicien raisonnable aura, pendant ce temps, autant de repos qu'il en peut désirer; dans de pareils cas, il n'y a rien à gagner avec le service banal.

En outre, dans plusieurs régions, les locomotives en service sont de types divers. Parfois, pour certains trains, par exemple ceux qui font le transit des marchandises de région à région, on se sert de très lourdes machines compound; tandis que, pour le service local, on aura des machines légères à deux ou trois essieux couplés. Dans ce cas, si, d'une part, le service est organisé par équipes banales pour tous les trains, et que, d'autre part, les mécaniciens aient à conduire aussi bien tous les trains que toutes les machines, ces hommes auront pour un voyage soit une lourde compound, soit une lourde machine simple; pour l'autre voyage, au contraire, ils peuvent avoir une machine légère de type totalement différent, et M. A. Level ne croit pas qu'il soit possible à un mécanicien, quel qu'il soit, de travailler aussi économiquement, quand il passe ainsi d'une machine à une autre, que s'il voyage toujours sur des locomotives de même type. « Mais, ajoute-t-il, si les locomotives étaient toutes semblables, je ne vois pas pourquoi un mécanicien, s'il est réellement capable, ne pourrait pas faire un aussi bon travail pendant un premier voyage, avec une machine, que pendant un deuxième voyage, avec une autre. »

M. Level résume son opinion en ces termes : « S'il est nécessaire d'employer des équipes banales, pour satisfaire aux exigences du service, pour augmenter le tonnage transporté, on ne doit pas hésiter à y recourir. Mais, quand le trafic se ralentit assez pour qu'il soit possible de donner à chaque mécanicien sa machine, je crois qu'on doit le faire. »

M. Van Alstine reprend alors la parole pour affirmer que, sur le réseau où il a été employé de longues années avant d'être au *Chicago Great Western*, les hommes n'aimeraient pas à revenir aux machines personnelles, parce que la génération actuelle de mécaniciens n'a jamais connu autre chose que la banalité; les mécaniciens savent le mal que donne une machine régulière, mal qu'ils n'ont pas actuellement; ils sont donc satisfaits de voir les choses demeurer telles qu'elles sont.

Sur le *Chicago Great Western*, M. Van Alstine dit que les locomotives, conduites par équipes banales, parcourent une moyenne de 7.200 kilomètres par mois; mais il paraît que, sur le réseau de

Digitized by Google

Pennsylvanie, au-delà de Pittsburgh, on espère, avec le service banal, faire parcourir à une machine jusqu'à 13.000 et même 14.500 kilomètres par mois, si cela était nécessaire. Dans ces conditions, d'ailleurs non encore réalisées, M. Van Alstine conclut que le service par équipes banales ne peut qu'être économique, et il serait alors le seul à employer, que le trafic soit actif ou qu'il soit réduit, parce qu'il en résulterait un réel profit.

On voit donc, par ce qui précède, que la question de la conduite des locomotives n'est pas moins controversée en Amérique qu'en Europe : c'est pourquoi il a paru intéressant de faire connaître les idées de quelques ingénieurs américains sur la question.

Digitized by Google

LE
GISEMENT DE MINERAI DE FER OOLITHIQUE
DE LA LORRAINE

Par M. François VILLAIN, Ingénieur au Corps des Mines.

AVANT-PROPOS.

Le but que nous nous proposons en publiant cette étude est de résumer, en les groupant d'une façon méthodique, les connaissances qu'on possède à l'heure actuelle sur le gisement du minerai de fer oolithique de la Lorraine.

La région minière que nous examinons en détail embrasse environ 90.000 hectares, tant dans l'arrondissement de Briey, en France, que dans les régions limitrophes du grand-duché de Luxembourg et de la Lorraine allemande.

Nous avons laissé de côté le bassin de Nancy, déjà très connu, et dans lequel il n'a été fait que peu de découvertes intéressantes dans ces dernières années.

Le bassin de Briey, au contraire, n'est bien connu que depuis la dernière campagne de recherches de 1894-1899.

Chargé du service des mines en Meurthe-et-Moselle depuis 1896, nous avons pu suivre personnellement un grand nombre d'explorations. Avant nous, M. l'Ingénieur en chef Cousin avait déjà réuni quantité de documents relatifs aux recherches effectuées de 1883 à 1896, et commencé l'étude de la topographie souterraine de la couche grise. Nous n'avons fait que continuer les travaux qu'il avait engagés et leur donner une conclusion. C'est

Digitized by Google

un devoir agréable pour nous de reconnaître tout ce que nous lui devons dans la circonstance et de lui exprimer ici notre bien vive gratitude.

Nous avons aussi les plus grandes obligations à notre collègue de Luxembourg, M. l'ingénieur Dondelinger, et à son collaborateur, M. le garde-mines Limpach, qui ont bien voulu, avec une complaisance à toute épreuve, nous documenter sur les mines du grand-duché.

Des indications géologiques ou paléontologiques fort précieuses nous ont été procurées par M. l'Ingénieur en chef Rolland, MM. les professeurs Bleicher et Nicklès, et M. Authelin, préparateur du Cours de géologie de la Faculté des Sciences de Nancy.

Il nous faudrait enfin citer presque tous les maîtres de forges de l'Est pour remercier ceux qui ont bien voulu nous fournir des renseignements sur les travaux d'exploitation de mines. Nous devons mentionner d'une façon toute particulière le concours très utile que nous avons rencontré en :

MM. de Wendel et leurs directeurs de mines, MM. Spanier et Bosment ;

M. Cavallier, directeur de la Société de Pont-à-Mousson, et M. Colin, directeur des mines de cette Société ;

M. Majer de Levalt, directeur des forges de Jarville, M. Millery, chef des laboratoires desdites forges, et M. Blanc, ingénieur des mines de Chavigny.

Nous leur adressons, ainsi qu'à tous ceux qui ont bien voulu répondre à nos demandes de renseignements, nos remerciements bien sincères.

Digitized by Google

CHAPITRE I.

GÉNÉRALITÉS.

§ 1. — Étendue et ressources du gisement.

Le gisement lorrain a une étendue considérable qui intéresse à la fois le grand-duché de Luxembourg, la Lorraine allemande et la France.

L'extrémité Nord-Ouest pénètre un peu en Belgique, sur les territoires de Musson et d'Halanzy, au Nord de Longwy et Gorcy.

Ce lambeau de gisement belge est, à vrai dire, négligeable et ne mérite d'être mentionné que pour mémoire (70.000 tonnes d'extraction annuelle).

La production annuelle des mines luxembourgeoises, allemandes et françaises est, en ce moment (*), de 18 millions de tonnes, savoir :

Luxembourg.....	6.000.000;
Lorraine allemande....	7.500.000;
Meurthe-et-Moselle....	4.500.000.

Dans le Luxembourg, la limite des terrains ferrifères passe par Rodange, Petange, Niederkorn, Differdange, Belvaux, Esch-sur-Alzette, Kayl et Dudelange. Entre cette limite et la frontière française et allemande, le gisement est exploitable sur environ 3.600 hectares et peut renfermer 300.000.000 de tonnes.

En Allemagne, la limite orientale du gisement passe par Kanfen, Entrange, Volkrange (6 kilomètres à l'ouest de Thionville), Erzange, Rombas, Norroy-le-Veneur,

(*) Année 1900.

Digitized by Google

Plappeville (5 kilomètres à l'ouest de Metz), Ars-sur-Moselle et Novéant. La ligne jalonnée par ces localités est à peu près Nord-Sud et suit le pied des falaises oolithiques du versant gauche de la Moselle. Les frontières française et luxembourgeoise forment, au Sud, à l'Ouest et au Nord, les autres limites du gisement allemand, dont l'étendue ainsi délimitée représente environ 43.000 hectares. Il contiendrait, d'après les auteurs allemands, un peu moins de 2.200.000.000 de tonnes de minerai. Cette estimation, qui tient compte des minerais siliceux peu recherchés de la partie méridionale, se décomposerait comme suit :

	Tonnes.
Partie septentrionale (au nord de la Fentsch) :	
Couche grise	1.045.000.000
Couche brune (d'après M. Kohlmann.)	280.000.000
Partie centrale, entre la Fentsch et Saint-Privat. (d'après M. Hoffmann).	605.895.000
Partie méridionale, entre Rombas, Saint-Privat et Novéant : Couche noire	250.000.000
TOTAL	2.180.895.000

Le gisement français se divise en deux parties bien distinctes, désignées communément sous les noms de *bassin de Briey* et *bassin de Nancy*. Ce dernier, le moins important, est séparé du premier par une zone à peu près stérile d'environ 40 kilomètres.

Il a été concédé, dans la région de Nancy, 18.536 hectares de terrains miniers, pouvant renfermer 200.000.000 de tonnes.

Dans le gisement de Briey, une étendue de 43.186 hectares a été concédée (y compris la région de Longwy-Villerupt). Les ressources qu'elle renferme peuvent s'évaluer à 2.300.000.000 de tonnes.

La région concédée est limitée, à l'Est et au Nord, par les frontières allemande, luxembourgeoise et belge ; à

Digitized by Google

l'Ouest, sa terminaison (autant qu'on peut l'apprécier aujourd'hui par les explorations faites) est marquée par une ligne ondulée présentant des parties très saillantes, vers l'Ouest, à Brainville, Baroncourt, Bazailles et Gorcy. Le second de ces saillants pénètre dans le département de la Meuse (arrondissement de Montmédy); mais, à part cette enclave dans la Meuse, de 1.200 hectares environ, tout le bassin de Briey est compris dans l'arrondissement du même nom (département de Meurthe-et-Moselle).

Ainsi, en résumé, le gisement lorrain embrasse une étendue de plus de 100.000 hectares de terrains miniers, et renferme approximativement, tant en Luxembourg qu'en Allemagne et en France, un tonnage de minerais qu'on peut évaluer à 5.000.000.000 de tonnes.

Nous nous proposons, dans ce qui va suivre, de faire l'inventaire méthodique de cette richesse, qui intéresse à un si haut degré l'industrie sidérurgique.

§ 2. — Situation géographique et premier aperçu géologique.

La région occupée par le gisement fait partie géographiquement et géologiquement du bassin parisien, dont la ceinture Nord-Est est constituée par les massifs primaires de l'Ardenne, l'Eifel, le Hundsrück et les Vosges.

Sur ces terrains anciens, on voit s'étager d'abord les trois termes du trias, puis les formations du lias, et ensuite celles de l'oolithe inférieure et de la grande oolithe. Ceux de ces terrains que nous aurons à mentionner particulièrement sont : le lias (toarcien), le bajocien, le bathonien et le callovien.

Relief de la région septentrionale du gisement et caractères hydrographiques. — Au pied des coteaux où se trouvent les affleurements du minerai de fer, s'étendent

Digitized by Google

des plaines formées par les assises marneuses du lias (supérieur et moyen).

La plaine du *Gutland*, au pied de la côte Rouge, dans le Luxembourg, est à la cote 300 environ (291 à la station de Petange, 307 à Differdange, 292 à Esch), tandis que le plateau sous lequel se trouve le minerai est à la hauteur moyenne de 430 (cote 426 à Westenhof, entre Differdange et Godbrange, 421 à Redange, 425 à Hussigny, 443 à Tiercelet, 434 à Bréhain).

Ce plateau est désigné communément, dans la région de Longwy, sous le nom de *Pays-Haut*. En Lorraine allemande, il se continue sous le nom de *Plateau d'Aumetz* (cotes 449 et 426 de part et d'autre d'Ottange, 400 à Aumetz). De ces plateaux descendent plusieurs cours d'eau, se dirigeant vers le Nord, et tributaires de la Moselle, savoir : l'Alzette, le ruisseau de Rumelange (Kaylbach) et le ruisseau de Dudelange. A l'Ouest, coulent la Chiers et la Moulaine, qui se rejoignent à Longwy, et sont tributaires de la Meuse. Plus au Sud, et grâce au pendage général du Pays-Haut, qui se fait, dans la partie française, vers le Sud-Ouest, on trouve la Crusnes, coulant, comme la Moulaine, vers l'Ouest, et se jetant dans la Chiers à Longuyon.

Dans la partie allemande, grâce à la dépression transversale profonde de Fontoy, les eaux de la Fentsch peuvent se diriger, au contraire, vers la Moselle, dans laquelle elles se jettent à Thionville.

Relief et caractères hydrographiques de la région méridionale. — Dans le versant français, au Sud de la vallée de la Crusnes, le bassin de la Meuse englobe encore les eaux de la Pienne et de l'Othain. Ce dernier ruisseau est séparé du versant de la Moselle par les hauteurs de Norroy-le-Sec, au Sud desquelles commence le bassin de l'Orne.

Digitized by Google

Ce cours d'eau est le plus important de toute la région minière, qu'il traverse entièrement de l'Ouest à l'Est, pour confluer finalement dans la Moselle, entre Richemont et Uckange.

Le Longeau et l'Yron, affluents de rive droite de l'Orne, dans lequel ils se jettent à Conflans, arrosent la région située à la pointe Sud-Ouest du gisement.

Les eaux tributaires de la Moselle ne peuvent arriver à ce fleuve qu'en passant par des vallées plus ou moins encaissées recoupant des terrains dont la surface générale présente une pente inverse de celle des eaux. Le sol est, en effet, près de Brainville, à la cote 200. Il remonte jusqu'à 260 au voisinage de Briey. La rivière du Woigot, affluent de rive gauche de l'Orne, charrie ses eaux, depuis Mance, entre deux lignes de hauteurs abruptes. A Briey, la vallée est très profondément encaissée.

En continuant toujours vers l'Est, le plateau de Briey remonte encore jusqu'à l'altitude 300, qu'il atteint à la frontière; puis on franchit un autre affluent de rive gauche de l'Orne, le Conroy, qui forme frontière sur une assez grande longueur. Enfin, lorsqu'on se rapproche en poursuivant vers le Nord-Est de Thionville, on gravit le plateau qui s'étend entre Moyeuvre et Hayange, à une altitude voisine de 350 (cote 341 au Sud de Ranguevaux, 358 à la ferme de Moreaux, 2 kilomètres au Sud d'Hayange).

Entre Hayange et Brainville-en-Woëvre, la distance à vol d'oiseau est de 30 kilomètres. La pente générale du sol est donc, d'après les cotes que nous venons de donner, de 1/2 p. 100. Le gisement de minerai a une pente moyenne environ 2 fois plus forte entre les mêmes points (cote 220 près d'Hayange, cote — 70 à l'Ouest de Brainville), soit près de 1 0/0 (Pl. V).

Digitized by Google

Consistance des morts-terrains. — Sous le bois d'Hayange, e mur de la couche grise est à 130 mètres sous le sol; il est à 150 mètres près de Briey, à 200 mètres à Conflans et à 260 mètres à Brainville.

La coupe des terrains peut être résumée comme suit en ces différents points :

A Brainville :

Callovien	30 mètres.
Bathonien	80 —
Bajocien	135 —
Toarcien (jusqu'au mur de la couche grise)	15 —
TOTAL	260 m.

A Conflans :

Bathonien	65 mètres.
Bajocien	120 —
Toarcien (jusqu'au mur de la couche grise)	15 —
TOTAL	200 m.

A Briey :

Bathonien inférieur	30 mètres.
Bajocien	100 —
Toarcien (jusqu'au mur de la couche grise)	20 —
TOTAL	150 m.

Sous le bois d'Hayange :

Bathonien inférieur	15 mètres.
Bajocien	100 —
Toarcien (jusqu'au mur de la couche grise)	15 —
TOTAL	130 m.

Les épaisseurs décroissantes du callovien et du batho-

Digitized by Google

nien, dans ces différentes coupes, sont la conséquence des érosions que la contrée a subies ; tandis que le bajocien subsiste à peu près complet, le bathonien et le callovien sont limités à une surface d'abrasion qui les fait finir en biseau vers l'Est.

Que ces deux étages aient existé autrefois en entier à l'aplomb du gisement de Briey, c'est une chose à peu près sûre, car l'oxfordien lui-même (dont les couches en place ne se retrouvent aujourd'hui que beaucoup plus à l'Ouest) a recouvert une partie de la région ferrifère. Ce fait est attesté par des résidus de sa dénudation, consistant en gros cailloux siliceux, qu'on retrouve çà et là dans la campagne, et qu'on a pu rattacher à l'oxfordien, en raison de la présence d'empreintes de *Cidaris florigemma* qui ont été observées dans des témoins analogues recueillis auprès de Nancy par M. le professeur Bleicher.

Une coupe qui serait faite d'Ottange à Baroncourt donnerait des résultats analogues à ceux de la coupe Hayange-Brainville. La couche grise, qui est à l'altitude 250 à proximité d'Ottange, descend graduellement vers le Sud-Ouest jusqu'à la cote zéro, à Baroncourt. La distance entre les deux points étant, à vol d'oiseau, de 27 kilomètres, la pente moyenne de la couche est encore ici, de 1 p. 100 environ.

La surface du sol, constituée par le bathonien inférieur sur les hauteurs d'Ottange, est à peu près à 170 mètres au-dessus de la couche grise. A Baroncourt, où le sol est formé par le bathonien supérieur, le recouvrement atteint 240 mètres.

§ 3. — Choix des procédés d'extraction.

Nécessité des puits d'extraction. — Cette rapide esquisse stratigraphique nous permet de voir que des puits de 200 à

Digitized by Google

Consistance des morts-terrains. — Sous le bois d'Hayange, e mur de la couche grise est à 130 mètres sous le sol; il est à 150 mètres près de Briey, à 200 mètres à Conflans et à 260 mètres à Brainville.

La coupe des terrains peut être résumée comme suit en ces différents points :

A Brainville :

Callovien	30 mètres.
Bathonien	80 —
Bajocien	135 —
Toarcien (jusqu'au mur de la couche grise)	15 —
TOTAL	260 m.

A Conflans :

Bathonien	65 mètres.
Bajocien	120 —
Toarcien (jusqu'au mur de la couche grise)	15 —
TOTAL	200 m.

A Briey :

Bathonien inférieur	30 mètres.
Bajocien	100 —
Toarcien (jusqu'au mur de la couche grise)	20 —
TOTAL	150 m.

Sous le bois d'Hayange :

Bathonien inférieur	[illegible]
Bajocien	[illegible]
Toarcien (jusqu'au mur de la [illegible] grise)	[illegible] —
TOTAL	130 m.

Les épaisseurs d[illegible] et du batho-

Digitized by Google

nien, dans ces [illegible]
des érosions [illegible]
cien subsiste à [illegible]
vien sont limités [illegible]
en biseau vers [illegible]

Que ces [illegible]
l'aplomb du [illegible]
près sûre, car [illegible]
place ne se [illegible]
l'Ouest a [illegible]
fait est attesté [illegible]
tant en gros [illegible]
dans la campagne [illegible]
en raison de [illegible]
gemma qui [illegible]
logues recueillis [illegible]
Bleicher.

Une coupe [illegible]
donnerait [illegible]
Hayange-Brain [illegible]
250 à proximité [illegible]
Sud-Ouest [illegible]
entre les deux [illegible]
mètres, la pente [illegible]
de 1 p. 100 [illegible]

La surface du sol, [illegible]
sur les hauteurs d'[illegible]
au-dessus de la [illegible]
formé par le bathonien [illegible]
240 mètres.

§ 3. — [illegible]

Nécessité des [illegible]
stratigraphie [illegible]

[illegible] val-
[illegible] des
[illegible] pré),
[illegible] r, des
[illegible] es par

[illegible] allée du
[illegible] s.
[illegible], la Société
[illegible] rain d'établir
[illegible] section utile de

Digitized by Google

250 mètres de profondeur sont indispensables en beaucoup de points pour extraire le minerai.

Jusqu'à ces derniers temps, toutefois, l'extraction par puits était tout à fait inconnue en Lorraine.

Actuellement, sept sociétés françaises exploitent ou se préparent à exploiter par puits. Ce sont :

1° La Société de Vézin-Aulnoye, à Homécourt ;

2° MM. de Wendel et Cie, à Jœuf ;

3° La Société de Pont-à-Mousson, à Auboué ;

4° La Société de Moutiers, à Moutiers ;

5° La Société des aciéries de Longwy, à Tucquegnieux ;

6° La Société des aciéries de Micheville, à Landres ;

7° La Société des aciéries du Nord et de l'Est, à Pienne (près Landres).

En Allemagne, les puits en exploitation ou en préparation sont ceux de :

1° La Société des hauts fourneaux de Rumelange, à Ottange ;

2° La Société d'Angleur, à Audun-le-Riche ;

3° La Société d'Aumetz-la-Paix, à Aumetz ;

4° La Société Krupp, à Aumetz ;

5° La Société de la mine Reichsland, à Boulange ;

6° La Société Rœchling et Cie, à Angevillers ;

7° La Société de Rombas, à Montois ;

8° La Société de la Moselle, à Sainte-Marie-aux-Chênes.

Exploitation à ciel ouvert ou par galeries à flancs de coteau. — Tout le minerai produit par les gisements de l'Est avant le fonçage des puits dont nous venons de parler était extrait à ciel ouvert ou sorti à flancs de coteau par des galeries partant des affleurements.

C'est encore uniquement par ces deux procédés que le Luxembourg arrive à produire annuellement 6 millions de tonnes.

Digitized by Google

Toutes les mines du groupe de Longwy-Villerupt sont également exploitées de cette façon (vallées du Coulmy, de la Chiers, de la Moulaine, de la côte Rouge et de l'Alzette). Les couches de minerai étant situées au-dessus des thalwegs de ces différentes vallées, il est facile d'extraire le minerai sans être gêné par les eaux. Trois mines cependant (Godbrange, Tiercelet et Bréhain), dont le pendage ne se fait pas vers le thalweg, ont dû installer des pompes électriques pour assécher les travaux. La traction électrique est également employée dans les deux premières de ces entreprises. Elle l'est aussi dans les mines de Micheville et Bréhain.

En Allemagne, les affleurements du minerai se rencontrent dans les vallées de l'Alzette, d'Ottange, de Volmerange, de la Fentsch, de l'Orne et de la Mance. Les coteaux de rive gauche de la Moselle qui se développent entre ces trois dernières rivières montrent également les affleurements de la formation ferrugineuse. C'est dans la partie méridionale de cette ligne de coteaux que se trouvent les mines d'Ars-sur-Moselle, qui étaient déjà exploitées au moment de la possession française.

Dans la vallée de l'Orne, des extractions considérables ont lieu par galeries, aux mines de Moyeuvre, de l'Orne, Lothringen, Saint-Paul et Rosselange.

Les deux premières sont obligées, en raison d'un aval-pendage qui ne peut s'assécher par galeries, d'avoir des puits d'exhaure (à Moyeuvre Petite et à Franchepré), munis de pompes très puissantes. On a eu à tirer, des travaux de la mine « Orne », jusqu'à 30 mètres cubes par minute.

Il existe aussi des affleurements dans la vallée du Conroy, qu'on a exploités quelque peu autrefois.

Dans la vallée de la Fentsch, à Knutange, la Société des Hauts Fourneaux de Fontoy est en train d'établir une galerie à grandes dimensions d'une section utile de

Digitized by Google

12 mètres carrés (qui avait 2.150 mètres de longueur au 1er janvier 1901), pour exploiter la mine d'Havange. Cette galerie, destinée aussi à servir à l'écoulement des eaux, est munie sous radier d'une conduite en béton, de 1 mètre de diamètre utile.

Un autre travail en galerie considérable, digne aussi d'être signalé, est celui de la Société Rœchling et Cie, partant de Beuvange pour rejoindre la mine d'Angevillers. Le développement total de la galerie sera de 5.500 mètres, dont 4.250 étaient déjà faits au 1er janvier 1901. Les dimensions de l'ouvrage sont : 2m,50 de hauteur, 3m,20 de largeur.

Non moins important est le travail du même genre que la Société Stumm a attaqué près d'Entrange pour aller rejoindre la mine de Rochonvillers. Il est déjà terminé sur un développement de plus de 4 kilomètres.

§ 4. — Altérations des couches aux affleurements.

Les affleurements des couches ayant subi profondément l'action des agents atmosphériques sont loin de représenter l'état originel des minerais. Comme les régions d'affleurement sont, d'autre part, très morcelées par des diaclases sans nombre, il est fort difficile de se représenter ce qu'était le gisement à son origine, si on prend, pour localités d'études, celles qui ont vu naître les premières exploitations de la Lorraine. La région de Nancy, en particulier, et celle du Luxembourg, y compris le bassin de Longwy, ne pouvaient donc fournir que de mauvais champs d'expérience à quiconque se proposait de systématiser les faits relatifs à l'allure et à la composition des couches.

Au contraire, les recherches en profondeur, exécutées tant en territoire allemand qu'en France, dans ces vingt

Digitized by Google

dernières années, ont donné sur les couches, conservées pour ainsi dire à l'état vierge, une foule de renseignements généralement concordants, dont il nous a paru possible de dégager une loi. Nous avons été amené à penser que la plupart des particularités qu'on rencontre dans le gisement pouvaient être expliquées par deux ordres de considérations, savoir :

1° L'emplacement de certaines failles ;

2° Le relief du mur des dépôts.

Ce sont ces considérations que nous allons exposer, en parlant principalement des nouvelles découvertes du Bassin de Briey.

§ 5. — Consistance de la formation ferrugineuse.

Nous commencerons par donner quelques indications sur la consistance de la formation ferrugineuse et sur les terrains encaissants.

La formation occupe la partie tout à fait supérieure du toarcien, et elle est recouverte par le bajocien, qui débute généralement par une puissante assise de marnes dites *marnes micacées*. Ces marnes ont jusqu'à 30 mètres d'épaisseur, et même plus.

A la base, la formation ferrugineuse repose sur des *marnes vertes gréseuses* et *pyriteuses*, qui sont suffisamment caractéristiques pour avoir servi, dans la pratique des sondages, d'horizon final.

Ces marnes gréseuses, presque entièrement dépourvues de restes organiques, surmontent directement les *marnes à ovoïdes* du lias supérieur.

Entre le toit des marnes gréseuses et le mur des marnes micacées, s'étend la formation ferrugineuse, qui comprend plusieurs couches exploitables, séparées par des intervalles plus ou moins stériles, marneux ou calcaires.

Digitized by Google

La prépondérance de l'élément marneux est assez générale; mais elle est bien plus prononcée dans le Sud que dans le Nord.

Sondage de Mars-la-Tour (DV) au Sud du bassin de l'Orne. — Ainsi le sondage DV de Mars-la-Tour a reconnu une formation ferrugineuse (très pauvre) de 27^{m},95, ainsi composée :

Marnes avec taches de calcaires.....	15^{m},22
Couche marneuse ferrugineuse (dont la partie supérieure est zonée de calcaire)..	7 ,01
Marne noirâtre.....	3 ,62
Couche brunâtre ferrugineuse avec pyrites...	2 ,10
TOTAL.....	27^{m},95

La formation reconnue par ce sondage était d'ailleurs tellement pauvre (12 à 25 0/0 de fer seulement) qu'elle n'a fait l'objet d'aucune demande en concession.

Sondage de Moineville (AC) au centre du bassin de l'Orne. — Au sondage AC de Moineville, on a obtenu la coupe suivante :

Calcaire ferrugineux avec veines sableuses.	1^{m},00
Minerai rouge brunâtre (pauvre).....	2 ,38
Calcaire ferrugineux (pauvre).....	4 ,13
Minerai rouge jaunâtre (pauvre).....	2 ,12
Calcaire grisâtre avec lit de minerai de 0^{m},72 à la base.....	5 ,05
Marne bleue micacée compacte.....	1 ,33
Minerai gris à grain fin (de bonne qualité)..	3 ,02
Calcaire ferrugineux veiné de minerai.....	2 ,22
Minerai très marneux.....	2 ,62
Marne gris verdâtre.....	1 ,60
TOTAL.....	25^{m},47

Digitized by Google

Sondage de Mairy (BC) au centre du bassin de Tucquegnieux. — Dans le sondage BC de Mairy, où la formation présente une grande épaisseur, la succession des terrains peut se résumer comme suit :

Calcaire ferrugineux brunâtre.....	5m,55
Marne stérile.....	0 ,30
Calcaire plus ou moins ferrugineux.....	4 ,55
Calcaire gris marneux presque stérile.....	3 ,70
Calcaire ferrugineux à veines coquillières..	0 ,95
Minerai rouge.....	0 ,90
Calcaire ferrugineux brunâtre.....	1 ,10
Marne ferrugineuse.....	7 ,95
Calcaire coquillier...	0 ,70
Minerai gris de bonne qualité.....	3 ,70
Calcaire ferrugineux (pauvre).....	3 ,98
Marne gris noir stérile.....	7 ,94
Marne gréseuse peu ferrugineuse.....	2 ,30
Minerai brun verdâtre siliceux.....	0 ,86
TOTAL.....	44m,48

La composition de la mine rouge et de la mine grise de ce dernier sondage est la suivante :

	Fer	Chaux	Silice	Alumine
Mine rouge.....	36 p. 100	13 p. 100	9 p. 100	8 p. 100
Mine grise.....	36	11	9	9

Sondage de Briey (FL) au Nord du bassin de l'Orne. — La coupe suivante, du sondage FL, de Briey, représente un des plus riches spécimens de la formation, au point de vue du nombre des couches exploitables.

Digitized by Google

SONDAGE DE BRIEY (FL).

COMPOSITION de la formation ferrugineuse	ÉPAISSEUR des couches	MUR DES COUCHES		COMPOSITION			
		Profondeur	Altitude	Fer	Chaux	Silice	Alumine
Toit de la formation..	»	122m,40	135m.98	»	»	»	»
Calcaire ferrugineux..	6m,58	128 ,98	129 ,40	»	»	»	»
Couche rouge.....	*3 ,40*	*132 ,38*	*126 ,00*	*43,38*	*8,29*	*6,20*	*5,73*
Calcaire ferrugineux..	0 ,97	133 ,35	125 ,03	»	»	»	»
Couche jaune.....	*2 ,67*	*136 ,02*	*122 ,36*	*34,82*	*15,00*	*6,58*	*4,96*
Calcaire ferrugineux..	3 ,38	139 ,40	118 ,98	»	»	»	»
Couche grise.....	*2 ,33*	*141 ,73*	*116 ,65*	*37,06*	*12,09*	*7,08*	*5,08*
Calcaire ferrugineux..	6 ,87	148 ,60	109 ,78	»	»	»	»
Couche brune.....	*1 ,72*	*150 ,32*	*108 ,06*	*31,94*	*4,35*	*29,46*	*7,81*
Couche verte.....	*4 ,43*	*154 ,75*	*103 ,63*	*29,56*	*19,18*	*18,79*	*3,24*
Epaisseur totale.....	32m,35						

Les stériles séparant les couches de minerai proprement dites sont rarement dépourvus complètement de fer ; ils en contiennent fréquemment de 10 à 15 p. 100. Ci-dessous la coupe du sondage de Valleroy (Y) montrant la composition moyenne des divers bancs de la formation.

Digitized by Google

SONDAGE DE VALLEROY (Y), EXÉCUTÉ EN 1883.

DÉSIGNATION DES COUCHES	ÉPAISSEUR	COMPOSITION		
		Fer	Chaux	Silice
Marnes micacées	18m,80	5,72	3,65	58,80
Toit de la formation ferrugineuse.				
Calcaire pauvre	2m,10	13,78	33,39	11,02
Calcaire ferrugineux	2 ,00	24,24	16,84	14,21
Calcaire pauvre	4 ,00	10,60	34,35	11,97
Couche rougeâtre pauvre	2 ,75	18,70	23,73	15,50
Marne grise et bleue ferrifère	4 ,60	19,28	18,01	26,18
Couche jaune	*1 ,20*	*33,69*	*14,31*	*7,29*
Couche grise	*4 ,20*	*39,10*	*6,95*	*6,97*
Mine siliceuse brune	*1 ,95*	*30,86*	*8,78*	*20,27*
Marne ferrugineuse	8 ,25	21,10	12,75	27,58
Mine noire	*1 ,15*	*32,58*	*12,47*	*4,95*
Mine verte tournant au grès	3 ,62	23,54	5,64	29,34
Mur de la formation.				
Grès supraliasique	0 ,40	11,84	9,37	48,92

§ 6. — Délimitation des couches exploitables.

Les couches de minerai ne sont donc pas toujours séparées bien nettement des bancs encaissants.

Il faut faire exception, toutefois, pour certaines couches où le passage du minerai au stérile se fait par un changement brusque de la roche. On en trouve un exemple très net dans certains sondages des environs de Landres, où la couche grise présente un toit bien franc, constitué par un calcaire grossier, fortement coquillier, qui se différencie vivement par son aspect et sa composition du minerai sous-jacent. En Allemagne, ce banc coquillier se rencontre aussi fréquemment. On le désigne sous le nom de *Bänkling*.

Le banc de calcaire ferrugineux qui occupe la partie supérieure de la formation est aussi très fréquemment

Digitized by Google

séparé d'une façon tranchée des marnes micacées qui le recouvrent.

Quoi qu'il en soit, dans la pratique, la démarcation des couches et des stériles est souvent une affaire de convenance pour l'exploitant. S'il désire obtenir un produit contenant beaucoup de chaux, il n'hésitera pas à exploiter, avec le minerai riche, un banc calcaire, plus pauvre, mais non marneux ; si, au contraire, c'est la silice qu'il recherche, il extraira avec le minerai un banc contigu moins riche, mais d'une teneur élevée en silice, tel le banc de $1^{m},95$, mentionné dans la coupe précédente, au mur de la couche grise.

Les couches dont la teneur moyenne en fer s'élève à 30 p. 100 sans atteindre 20 p. 100 de silice mériteraient seules, en général, le nom de minerais; mais, en réalité, on tire parti de couches ne tenant pas plus de 20 à 25 p. 100 de fer, surtout quand elles contiennent beaucoup de chaux, la production de la fonte Thomas exigeant des lits de fusion calcaire. Nous croyons donc prudent de nous abstenir de définir la *couche exploitable;* il suffira d'une façon générale de dire qu'une couche offre des chances d'utilisation quand elle remplit les trois conditions suivantes : teneur en fer de 30 p. 100, teneur en silice inférieure à 20, épaisseur de 1 mètre environ.

Minières d'Hussigny. — On exploite, aux minières d'Hussigny et dans celles de Redange (Lorraine annexée), par travaux à ciel ouvert, la formation dont la coupe figurée ci-après renferme un calcaire ferrugineux (n° 2), qui a été utilisé quelquefois malgré sa pauvreté.

Digitized by Google

1.	Calcaire gris pauvre.....	0m,75	
	Calcaire ferrugineux	2 ,00	Fer 30 Chaux 16 Silice 12
	Calcaire pauvre	3 ,50	
	Banc coquillier.....	1 ,50	
2.	Calcaire ferrugineux avec lits de mine fine.....	2 ,00	Fer 21 Chaux 26 Silice 10
	Calcaire ferrugineux compact, parfois très pauvre.....	2 ,00	
3.	Couche rouge avec lits de mine fine intercalés entre des bancs plus compacts ...	5 ,00	Fer 39 Chaux 6 Silice 13
	Calcaire marneux stérile.....	3 ,50	
4.	Couche grise, jaunâtre et friable à la partie supérieure, gris verdâtre et compacte en bas (elle nécessite un triage des 2/5)	3 ,00	Fer 36 Chaux 6 Silice 18
	Marnes micacées vertes.....	1 ,00	
5.	Couche noire en grande partie friable	2 ,50	Fer 41 Chaux 1 Silice 13
	Calcaire marneux	2 ,00	
6.	Couche verte (inexploitée et mal déterminée en raison de l'affluence des eaux).....	1 ,25 ?	
	TOTAL....	30m,00	

Terminologie usuelle pour la désignation des couches de minerais. — Les couches 1, 2, 3 de la coupe précédente (calcaires et couche rouge) forment un faisceau qui présente dans son ensemble une grande similitude, et il est rationnel de les ranger en un étage unique qui serait l'*étage supérieur*. La couche grise (4) formerait l'*étage moyen*, et la noire et la verte (5 et 6), l'*étage inférieur*.

Dans le bassin de Nancy, on n'emploie pas d'autres dénominations que celles de couches *supérieure*, *moyenne* et *inférieure*.

Digitized by Google

Dans le bassin de Briey, la série complète des couches comprendrait :

Étage supérieur	Calcaires ferrugineux Couche rouge
Étage moyen . .	Couche jaune Couche grise
Étage inférieur.	Couche brune Couche noire Couche verte

En Allemagne et dans le Luxembourg, les étages moyen et inférieur sont les mêmes qu'en France ; mais on subdivise davantage l'étage supérieur et on y distingue de haut en bas :

Couche sableuse
Calcaires ferrugineux
Couche rouge siliceuse
Couche rouge calcareuse.

Si chacun de ces horizons pouvait donner lieu à une exploitation distincte, on aurait donc à considérer, en France, sept couches, et, en Luxembourg et Allemagne, neuf couches.

En réalité, ce n'est que dans les exploitations à ciel ouvert, où l'on est obligé, par le mode même d'extraction, d'abattre indistinctement les couches pauvres et les couches riches, que l'on arrive à se rapprocher de ce maximum.

§ 7. — Nombre de couches pratiquement exploitables.

Dans les exploitations souterraines, on n'exploite pas, en général, plus de trois couches.

Mine de Micheville. — Dans la mine de Micheville, par exemple, on trouve des chantiers d'abatage simultanément : 1° dans les calcaires ; 2° dans la couche rouge ;

Digitized by Google

3° dans la couche grise. La coupe au puits d'aérage n° 2 est la suivante :

Calcaires du bajocien	32m,45	morts-terrains.
Marnes micacées....	22 ,50	
(*toit de la formation ferrugineuse*)		
Calcaires pauvres ...	4m,80	
		Composition moyenne de l'ensemble des chantiers.
Calcaire ferrugineux exploité.....	*2 ,10*	— *Fer : 29; chaux : 16; silice : 8.*
Calcaire marneux stérile	2 ,80	
Couche rouge exploitée.....	*2, 70*	— *Fer : 38; chaux : 6; silice : 14.*
Calcaire marneux stérile	4 ,20	
Couche grise exploitée.....	*1 ,60*	— *Fer : 40; chaux : 3 ; silice : 15.*

L'extraction journalière est de 1.000 tonnes environ, dont les 2/3 en mine rouge, 1/4 en calcaire et le reste, soit moins de 1/10, en mine grise.

Ce mélange péchant par défaut de calcaire, la Société de Micheville le complète, pour obtenir un lit de fusion propre à la production de la fonte Thomas, par des minerais calcaires (contenant de 20 à 30 p. 100 de chaux) qu'elle tire des minières du Luxembourg.

Sondage de Pienne (CE) dans le bassin de Landres. — Dans la plupart des nouvelles mines qui viennent d'être instituées dans le bassin de Briey, la couche grise, seule, méritera d'être exploitée. Sa qualité et sa puissance exceptionnelles compensent d'ailleurs avantageusement l'absence d'autres couches. Témoin la couche ci-après du sondage CE de Pienne.

Digitized by Google

Calcaires jaunâtres rougeâtres, plus ou moins coquilliers	3m,35
Calcaire marneux	5 ,75
Minerai rouge pauvre (Fer, 24 — Chaux, 20 — Silice, 16)	1 ,55
Marnes avec rognons calcaires	7 ,15
Banc calcaire coquillier à éléments grossiers (toit bien net de la couche grise)	0 ,32
Couche grise (Fer, 42 — Chaux, 9 — Silice, 5)	*5 ,68*
Calcaire marneux et marnes	8 ,65
Couche de minerai brunâtre pauvre	0 ,40
Marnes verdâtres gréseuses, avec pyrites à la base	8 ,00
TOTAL	40m,85

§ 8. — ÉPAISSEUR DE LA FORMATION FERRUGINEUSE.

Dans son complet développement, elle oscille entre 25 et 50 mètres. Sur les bords du gisement, elle diminue graduellement jusqu'à zéro. Au contraire, dans certaines parties, notamment dans la région de Sancy, en France, et de Ludelange, en Allemagne, elle atteint plus de 50 mètres. Ces épaisseurs extrêmes ne sont pas toujours un indice de richesse, les sédiments pauvres pouvant y jouer un rôle prédominant.

Dans le bassin de Nancy, l'épaisseur totale de la formation n'est jamais supérieure à 10 mètres; celle des marnes micacées qui la surmontent n'excède pas 5 mètres. Il y a donc un amincissement très sensible des étages dans le sud du gisement.

Comme le montrent les divers exemples cités plus haut, les minerais exploitables figurent pour une proportion très variable dans la formation. Cette proportion atteint 1/2 dans les minières exploitées à ciel ouvert;

Digitized by Google

mais elle reste en dessous de 1/6 et descend fréquemment jusqu'au 1/10 dans les mines souterraines.

Composition des minerais. — Nous reviendrons, au chapitre VII, sur la constitution physique et chimique des minerais.

Bornons-nous, pour le moment, à citer la composition moyenne que les maîtres de forges recherchent le plus :

Peroyde de fer.....	47	fer métallique = 42
Protoxyde de fer	12	
Chaux	9	
Silice	6	
Alumine	6	
Acide phosphorique ..	2	
Corps divers.....	1	
Perte au feu.....	17	
TOTAL....	100	

Des échantillons choisis contiennent quelquefois beaucoup plus de fer, jusqu'à 60 p. 100; mais ils ne représentent pas la teneur pratique des couches, qui reste comprise généralement entre 30 et 40 p. 100.

§ 9. — APERÇU PALÉONTOLOGIQUE.

Avant de décrire les failles qui servent de base à la théorie de la répartition des minerais, il convient de s'appesantir un peu plus que nous ne l'avons fait jusqu'ici sur les formations géologiques qu'on rencontre dans la région et de dire un mot des données paléontologiques qui servent à les reconnaitre.

Toarcien supérieur. — Le soubassement du gite est formé, comme nous l'avons dit plus haut, par les *marnes à ovoïdes calcaires* du toarcien supérieur, qui ont pour fossile caractéristique : *Grammoceras fallaciosum*. Au-

Digitized by Google

dessus de ces marnes viennent les *marnes vertes gréseuses* avec pyrites, sur lesquelles repose directement la *formation ferrugineuse*, caractérisée paléontologiquement par des *Dumortieria*, *Grammoceras aalense* et *Grammocerias mactra*.

On s'est demandé si la formation ferrugineuse ne devait pas être rattachée en partie au toarcien et en partie au bajocien. Cette question semble devoir être tranchée dans le sens de la négative. Une collection de fossiles retirée de l'exploitation des mines de Tiercelet, où l'on n'extrait que les minerais des couches supérieures, a été reconnue comme ne renfermant que des formes liasiques (vertèbres de reptiles, *Grammoceras subcomptum*, *Branco*, *Dumortieria* sp., *Gryphea ferruginea* Terquem, *Arca* sp., *Belemnites* sp., *Trigonia*, *Pinna*, *Pleurotomaria*, *Lima*, *Pholadomya fidicula* Sow., *Terebratula* sp., *Pecten* sp.). La partie supérieure de la formation ferrugineuse coïnciderait donc avec la fin des dépôts toarciens.

Bajocien. — Le bajocien vient ensuite, mais avec une lacune qui semble indiquer un exhaussement, tout au moins partiel, de la région sous-marine dans laquelle avaient lieu les dépôts.

Les zones à *Lioceras opalinum* et à *Harpoceras Murchisonæ*, par lesquelles débute le bajocien dans les localités où il est complet, font défaut en nombre de points, par exemple aux environs de Nancy, où le contact du toarcien avec le bajocien se fait par la zone à *Lioceras concavum*, représentée à Marbache, en particulier, par un banc de *conglomérat* ferrugineux contenant une faune très riche (*Lioceras concavum*, *Lioceras Bradfordense*, *Ludwigia cornu*, *Ludwigia rudis*,..).

On y rencontre, de plus, des fragments de fossiles toarciens fortement usés, roulés, et en débris (*Grammoceras*).

Digitized by Google

Dans le bassin de Longwy, le même niveau a été reconnu par M. Authelin, qui y a recueilli les formes du groupe de *Lioceras concavum*, immédiatement au-dessous des marnes micacées, comme à Nancy.

M. Authelin pense que les formes qui ont été citées précédemment sous le nom de *Harpoceras Murchisonæ* appartiennent au groupe de *Lioceras concavum*. On rencontre également dans le bassin de Longwy, dans la zone à *concavum*, des formes d'ammonites du groupe d'*aalense* qui ont été certainement roulées.

Le conglomérat n'a jamais qu'une faible épaisseur, $0^m,50$ au plus; mais il est rare qu'il ne soit pas représenté. C'est au-dessus de cet horizon que viennent les marnes micacées appartenant encore à la zone à *Lioceras concavum*. Ces marnes sont à leur tour surmontées d'assises calcaires compactes, dans lesquelles on trouve des espèces du genre *Sonninia*. Ces calcaires ont jusqu'à 80 et 90 mètres d'épaisseur dans le bassin de Briey; ils se terminent par les roches à *Polypiers*, qui forment un niveau très caractéristique par sa dureté (Castine, à texture saccharoïde). Latéralement on trouve des assises avec *Cæloceras* du groupe *Humphriesianus*.

Bathonien. — Le bathonien débute par une assise marneuse connue sous le nom de *marnes de Longwy* (à *Cosmoceras Longovicensæ* et formes voisines).

Ensuite vient une assise calcaire, très compacte, surtout à la partie supérieure donnant la *pierre de taille* du pays (*oolithe de Jaumont*).

Avec cet horizon se termine le bathonien inférieur.

Le bathonien *moyen* débute par une assise de marnes assez puissante, dites *de Gravelotte*, que surmontent les caillasses à *Anabacia orbulites* et *Ostrea costata*, niveau très caractéristique, fort utile pour les déterminations géologiques sur le terrain.

Digitized by Google

Le bathonien *supérieur* vient ensuite avec les *marnes à Ostrea acuminata* sp. et quelques bancs calcaires marneux, très irréguliers, avec *Rhynchonella varians*, *Waldheimia lagenalis*, etc. Au-dessus se trouve une assise marneuse à *Ostrea Knorri* et une formation peu fossilifère, de consistance marneuse ou calcaire (dalle oolithique d'Etain).

Callovien. — Le callovien inférieur intéresse seul la région ferrifère. D'après les études de M. Nicklès, il se montre aux environs de Brainville-en-Woëvre, avec *Cosmoceras Gowerianum* et de *nombreuses Trigonies* (*Trigonia scarburgensis* et *Trigonia elongata*).

Nous avons donné précédemment les épaisseurs moyennes des différents terrains qui viennent d'être rapidement passés en revue. Nous avons, en outre, donné de nombreuses coupes de la formation ferrugineuse pour fixer les idées du lecteur; nous pouvons donc aborder maintenant l'étude des failles et exposer la théorie de la genèse des minerais.

CHAPITRE II.

THÉORIE DES FAILLES NOURRICIÈRES.

---

§ 1. — Revue rétrospective des travaux publiés sur le gisement.

C'est un fait remarquable que tous les auteurs qui ont décrit le gisement lorrain ont insisté énormément sur les failles qui le découpent. Cependant tous ont admis explicitement ou implicitement qu'elles ne jouaient aucun rôle

Digitized by Google

dans la répartition des minerais. En cherchant à démontrer le contraire aujourd'hui, pour certaines de ces failles que nous appelons « failles nourricières », nous avons beaucoup moins l'ambition de faire œuvre de savant que de fournir aux praticiens (exploitants de mines et maîtres de forges), une méthode simple et logique, qui leur permette d'expliquer et de prévoir les faits dans lesquels, jusqu'à ce jour, le rôle du hasard avait été exagéré.

L'élément nouveau que nous faisons entrer en jeu, le relief du mur des couches, n'avait jamais été considéré. Or, selon nous, on ne peut se rendre compte méthodiquement de la répartition des minerais que par la considération simultanée de ces deux éléments : *failles* et *reliefs*. C'est pour avoir négligé les seconds que la loi qui lie la richesse des couches aux directions des failles est restée ignorée pendant longtemps.

On la pressentait cependant d'une manière plus ou moins confuse, quand on disait que les minerais étaient plus riches le long des vallées que sous les plateaux. Les vallées de la région sont, en effet, des vallées de fracture qui marquent presque toujours des directions de failles.

Le bassin de l'Orne, dont l'allongement Ouest-Est se fait comme la vallée de ce nom, avait déjà intrigué des géologues, qui se refusaient à voir, dans cette coïncidence, un cas fortuit.

Travaux de MM. Braconnier et Daubrée. — Braconnier mettait en évidence, dans son ouvrage paru il y a plus de vingt ans (*Description des terrains de Meurthe-et-Moselle*, Nancy, 1879), les deux principaux systèmes de failles N.E.-S.O. et N.O.-S.E., qui découpent la contrée suivant deux directions sensiblement orthogonales. Il montrait que les méandres de l'Orne, dans la partie du cours de cette rivière qui suit des vallées de fracture, sont dirigés suivant ce double système de cassures.

Digitized by Google

Braconnier n'attribue, toutefois, aucun rôle aux failles dans la répartition des minerais. Dans sa *Description géologique des terrains de Meurthe-et-Moselle* (p. 207; Savy, 1883), il s'exprime ainsi, à propos des variations constatées dans la puissance et la richesse des couches de minerai : « Les accidents de la surface du sol et les « failles sont évidemment sans influence sur ces varia- « tions, *car ils sont postérieurs* au dépôt du minerai. »

On trouve cependant, à la page 333 du même ouvrage, ce qui suit : « Suivant *certaines directions*, l'on peut « suivre des bancs sur des étendues considérables; dans « le sens perpendiculaire, on observe des amincissements « progressifs, souvent très rapides. Les lits stériles ont « la même forme lenticulaire. »

Et à la page 201, parlant de la faille de Godbrange : « Enfin, dans le système N.E.-S.O. la faille de God- « brange limite, à l'Ouest, le bassin des riches minières « d'Hussigny. »

Mais il n'en tire aucune conséquence au sujet de la distribution des couches de minerais, attendu qu'il n'avait aucune donnée précise sur les reliefs des couches, qui permettent seuls, par la considération du rôle joué par la gravité, de déterminer les directions suivant lesquelles le minerai s'est trouvé porté de préférence.

Daubrée, frappé du rôle des failles dans la formation du relief du plateau de Briey, a pris pour exemple du creusement des vallées de fracture, suivant les diaclases et paraclases, la région même qui nous intéresse, et l'on trouve, aux pages 362 à 364 de son *Traité de Géologie expérimentale* (Dunod, 1879), une carte qui fait ressortir les nombreuses dislocations qui ont affecté le plateau de Briey.

Travaux de M. Hoffmann. — Les auteurs allemands qui ont étudié le gisement de la Lorraine ont tous donné, dans

Digitized by Google

leurs mémoires, une grande place à la description des failles. Étudiant la répartition des minerais dans la région comprise entre Fontoy et Saint-Privat, M. Hoffmann (*Stahl und Eisen*, 1896, n° 24) fait la constatation suivante :

« La puissance des minerais et des couches interca-
« laires décroît du Nord au Sud et croît de l'Est à l'Ouest.
« On peut observer toutefois des variations locales;
« mais l'augmentation ou la diminution de puissance se
« fait toujours graduellement. Des renflements brusques,
« comme des rétrécissements subits sont choses absolu-
« ment inconnues.

« La teneur en fer des couches, et, par suite, leur
« degré d'exploitabilité, est très variable. *On observe des*
« *zones allongées du Sud-Ouest au Nord-Est dans les-*
« *quelles la teneur en fer est maximum.* »

Si nous notons dès maintenant que les failles de Neufchef, de l Orne, de Rombas, affectent précisément cette même direction, on conviendra qu'il est assez naturel de faire un rapprochement entre l'existence des failles et la distribution des zones de richesses.

Nous verrons plus loin qu'on explique, en effet, la formation des couches riches du bassin de l'Orne en faisant intervenir les failles précitées, que nous rangeons dans la catégorie des *nourricières*.

Travaux de M. Greven. — A la suite de M. Hoffmann, qui ne s'était occupé que de la partie centrale du gisement lorrain, M. Greven a étudié les couches de la région méridionale de la Lorraine allemande (*Das Vorkommen des oolithischen Eisenerzes im südlichen Theile Deutsch Lothringens. — Stahl und Eisen*, 1898, n° 1).

Les failles ne sont mentionnées, dans son mémoire, qu'au point de vue stratigraphique. La portion de gisement qui fait l'objet du travail de M. Greven est

Digitized by Google

d'ailleurs, à tous égards, la plus ingrate de tout le gisement. Elle ne renferme pas ou presque pas de couche grise. La couche noire y est seule représentée, mais, la plupart du temps, avec une teneur élevée en silice qui diminue considérablement sa valeur. La puissance de la couche est d'ailleurs peu importante, 1 à 2 mètres ; c'est à cause de cette pauvreté de gisement que les anciennes usines de Novéant, d'Ars et les premiers hauts fourneaux de Maizières ont eu une destinée plutôt malheureuse.

Travaux de M. Kohlmann. — Tout autre est le cas de la région Nord de la Lorraine, confinant au Luxembourg. M. Kohlmann a publié une étude très documentée de cette partie du bassin, sous le titre : *Die Minette Formation Deutsch-Lothringen Nördlich der Fentsch* (*Stahl und Eisen*, 1898, n° 13), dans laquelle les failles sont minutieusement décrites.

L'auteur a joint à son mémoire deux coupes que nous reproduisons sans en changer l'échelle (coupes I et II) (Voir Pl. VII). On voit très nettement, sur la première, l'enrichissement des couches inférieures au voisinage de la faille de Crusnès (faille de Deutsch-Oth des Allemands) et l'influence de la faille médiane et de la faille d'Ottange sur le dépôt des couches moyennes dans un fond de bateau à pentes douces. Très suggestive aussi est l'indication des dépôts lenticulaires, séparés en deux parties inégales par la faille de Fontoy, dans la coupe II, la partie la plus importante se trouvant en aval de la faille. On remarque, enfin, dans les deux coupes, l'amincissement graduel de la formation vers l'Est. Les affleurements sur les hauteurs de la rive gauche de la Moselle sont, en effet, tout à fait inexploitables.

Digitized by Google

§ 2. — Ancienne théorie des affleurements.

Ce fait, qui est général, permet de conclure de suite que la formation ferrugineuse n'est pas aussi littorale qu'on l'admettait autrefois. Braconnier pensait que l'oxyde de fer parvenu dans le fond de la mer par des sources thermales, jaillissant au travers de certaines fissures, était progressivement *rejeté vers le rivage* (*Description géologique*, etc., 1883, p. 334). Cette explication n'était certainement pas exacte ; mais on l'admettait par suite de la remarque généralement faite que les couches riches exploitées ou connues à l'époque se trouvaient en bordure des régions minières, aussi bien à Nancy qu'à Longwy et dans le Luxembourg ; et que ces couches allaient en décroissant vers l'intérieur des plateaux. On commettait une confusion en prenant les affleurements des *mines* pour ceux des *couches*. En réalité, dans les localités les plus rapprochées de l'ancien rivage de la mer toarcienne, la formation ferrugineuse a toujours été très faiblement représentée.

Au contraire, lorsque des érosions ont mis à nu des couches puissantes, les affleurements (le mot étant pris dans le sens minier) peuvent être très riches.

Supposons, par exemple, dans les coupes I et II de M. Kohlmann, que les érosions qui ont creusé la vallée de la Moselle se soient étendues jusqu'à celle du Kaylbach où passe la faille d'Ottange ; il est certain qu'on aurait eu là, dans le voisinage de cette faille, des mines d'affleurements extrêmement riches.

Coïncidence des affleurements riches du Luxembourg avec la direction des principales failles. — En fait, ce qui ne s'est pas réalisé en Lorraine allemande s'est produit pour

Digitized by Google

le Luxembourg. Les érosions qui ont fait disparaître l'oolithe inférieure et une partie du lias, au nord de la frontière française et allemande, ont mis à jour les riches gisements de Differdange, d'Esch et de Rumelange (*).

Les noms de ces localités, qui sont ceux qu'on emploie communément dans le pays pour désigner les centres miniers les plus importants, sont aussi ceux qui servent à nommer les trois failles principales qui découpent la formation.

La faille de Differdange n'est autre que celle qui est désignée en France sous le nom de Godbrange.

La faille de Rumelange porte le nom d'Ottange en Allemagne et celui d'Audun-le-Roman en France.

Enfin, celle d'Esch, qui s'appelle Deutsch-Oth en Allemagne et Crusnes en France, jalonne précisément la limite occidentale de la zone riche des minières luxembourgeoises du bassin d'Esch.

§ 3. — Récurrence des actions de plissement.

On est donc amené à penser que certaines failles sont antérieures à la formation des minerais et que c'est à elles qu'on doit rattacher en partie la constitution du gisement.

Sans doute, les formations plus récentes sont affectées aussi par ces failles, et le bajocien et le bathonien, en particulier, sont fréquemment dénivelés sur leur parcours; mais cela ne prouve qu'une chose, c'est que les cassures de l'écorce se sont renouvelées à différentes époques suivant les mêmes directions.

Rien de plus naturel, d'ailleurs, et, comme on sait, de plus constamment observé en géologie. Les remarquables

(*) Il est fort probable que l'existence des minerais de fer de la Meuse et des Ardennes, dans les niveaux du callovien, de l'oxfordien, et des sables verts, dérive de ces érosions.

Digitized by Google

travaux du géologue anglais Godwin Austen, si vivement mis en lumière dans le mémoire de M. l'ingénieur en chef Marcel Bertrand, sur le raccordement des bassins houillers du Nord de la France et du Sud de l'Angleterre (*Annales des Mines*, 1re livraison, 1893), ont démontré que les reliefs qui s'observent dans des terrains d'âges différents superposés sont semblables dans une même région.

En particulier, les plis synclinaux et anticlinaux se répètent, les nouveaux se moulant pour ainsi dire sur les anciens.

Plis synclinaux et anticlinaux dans les différents étages de la région ferrifère. — Voyons comment cette loi se vérifie en Lorraine.

Les courbes de niveau du mur de la couche grise de la Pl. V font ressortir l'existence d'un grand synclinal allant d'Ottange à Tucquegnieux, que nous désignerons indifféremment par le nom de l'une ou l'autre de ces deux localités.

La carte géologique de la surface indique que le bathonien moyen s'avance à l'aplomb de cette dépression, très loin vers le Nord-Est, dans la direction de Sancy-Trieux, et au-delà de la frontière jusque près d'Hayange. Le bathonien supérieur dessine aussi une pointe dans ce synclinal, plus à l'Ouest, jusque près de Lubey.

Un autre synclinal, bien dessiné également par les courbes de niveau de la couche, est celui de Giraumont-Brainville, dans le bassin de l'Orne. On voit, de même, à la surface, le bathonien supérieur s'avancer jusqu'à Giraumont, et le callovien lancer une pointe sur Brainville. Inversement, deux anticlinaux allongés, l'un dans la direction de Norroy-Gondrecourt, au Nord du synclinal de Tucquegnieux, et l'autre dans la direction de Conflans-Dompierre, au Nord de l'anticlinal de Brainville, sont

Digitized by Google

décelés à la surface par des rentrants que forme, vers l'Ouest, la limite des terrains bathoniens supérieurs.

Un troisième anticlinal courant de Serrouville à Preutin se dessine encore très nettement sur la topographie souterraine de la Pl. V.

Entre cet anticlinal et celui de Gondrecourt se trouve le synclinal de Landres-Joudreville, que nous désignerons par le nom de la première de ces localités.

On voit encore le bathonien supérieur dessiner dans ce synclinal un bombement vers l'Est, jusqu'à Pienne.

Enfin, tout au Sud, de Vernéville à Mars-la-Tour, un quatrième anticlinal se dessine de nouveau dans la topographie de la couche. Il est reproduit à la surface par les affleurements du bathonien inférieur, qui reculent vers l'Ouest jusqu'à Hannonville.

§ 4. — Divisions du gisement en bassins.

Tous les anticlinaux que nous venons de citer sont des régions pauvres. Les régions riches se trouvent, au contraire, dans les synclinaux. Telle est la grande loi, indépendante de toute théorie, qui domine la répartition des minerais.

Le mot *bassin*, qui sert dans la langue courante à désigner les régions minières, est donc bien approprié à la situation réelle des choses. Les quatre anticlinaux énumérés plus haut délimitent cinq bassins, savoir :

1° Au Nord-Ouest, le bassin de *Longwy-Differdange-Villerupt*, limité à l'Est par la grande faille de Crusnes et l'anticlinal de Serrouville-Preutin.

C'est la région des mines rouges et grises, plutôt siliceuses que calcareuses ;

2° Le bassin d'*Ottange-Tucquegnieux*, limité au Nord-Ouest par la faille de Crusnes, l'anticlinal de Preutin, les

Digitized by Google

failles de Bonvillers et de Norroy et l'anticlinal de Gondrecourt; et /au Sud-Est, par les failles de Neufchef et d'Avril;

3° Le bassin de *Landres*, limité à l'Est et au Sud-Est par les failles de Bonvillers et de Norroy et l'anticlinal de Gondrecourt. Au Nord-Ouest, ce bassin n'a pas de terminaison bien nette, faute d'anticlinal dans cette direction. La formation qui s'y étale en plateure renferme de moins en moins de fer et de plus en plus de sédiments pauvres (quartzeux principalement);

4° Le bassin de l'*Orne*, limité au Nord par les failles de Neufchef et d'Avril, et au Sud par l'anticlinal de Vernéville, Mars-la-Tour;

5° Le bassin de *Saint-Privat-Novéant*, situé au Sud de celui de l'Orne, et s'étendant jusqu'à la frontière française à hauteur de Novéant.

C'est la région des mines noires siliceuses.

Les meilleurs minerais sont ceux qu'on trouve dans les deuxième, troisième et quatrième bassins; ce sont ceux de la couche grise riche et calcaire qui ont été recherchés récemment par les métallurgistes avec beaucoup d'ardeur, en raison des avantages qu'ils présentent pour la fabrication de la fonte Thomas.

§ 5. — Nature et degré d'authenticité des documents utilisés dans cette étude.

La couche grise est celle que l'on connaît le mieux dans le gisement.

C'est sa topographie que nous avons figurée sur la Pl. V, et c'est d'elle que nous parlerons principalement dans ce qui va suivre; mais, avant de passer à la description détaillée de cette couche, quelques brèves indications sur la nature des documents qui ont servi de base à notre étude sont nécessaires.

Digitized by Google

Recherches en territoire français. — Les nombreux sondages exécutés en France, dans ces dernières années, ont été suivis avec le plus grand soin par l'Administration des Mines. La traversée de la formation ferrugineuse a été faite au trépan à échantillons. Les carottes retirées des trous de sonde ont été, en général, parfaitement réussies, sauf lorsque les minerais, trop friables, se désagrégeaient pendant le battage.

Les agents du Service des Mines ont inspecté toutes les collections d'échantillons ainsi formées, et ont établi des coupes détaillées de chaque sondage, d'accord avec les explorateurs. Ceux-ci ont fourni à l'Administration, pour chaque recherche, un dossier comprenant une coupe d'ensemble des terrains traversés, au 1/200e, et une coupe détaillée de la formation ferrugineuse, au 1/50e. Cette dernière faisait ressortir l'épaisseur et la composition des différentes couches dont les éléments étaient déterminés carottes par carottes, ainsi que les cotes d'altitudes intéressantes.

Une notice spéciale faisait connaître l'emplacement du sondage et les particularités du travail, notamment les niveaux d'eau observés.

Nous donnons, en *annexe*, à titre de modèle, la reproduction des trois pièces A_1, A_2, A_3, constituant le dossier du sondage de Joudreville (CB) de MM. de Wendel et Cie. Pour la commodité des dépouillements, nous avons établi, pour chaque sondage, une coupe résumée dont la pièce A_4 fournit le type. Les analyses moyennes qui figurent dans ce résumé sont déduites de celles qui ont été portées, carottes par carottes, sur la coupe au 1/50e.

La constitution de ces dossiers, qui a été préconisée par M. l'Ingénieur en chef Cousin, dès 1894, a facilité beaucoup les rapprochements des données fournies par les diverses recherches.

En faisant la part des différences de procédés suivis,

Digitized by Google

soit dans les prises d'échantillons, soit dans les méthodes d'analyse, d'une société à une autre, on peut dire que, d'une façon générale, les résultats des différentes recherchesd'une même région, malgré leur diversité d'origine, sont homogènes. Il faut cependant faire quelques réserves sur la limitation des couches de minerais, qui a été interprétée plus ou moins étroitement suivant les sociétés.

Dans l'*Annexe* A_5, on trouvera le résumé des principales données obtenues, sur le gisement français, par les sondages ou puits exécutés dans ces vingt dernières années.

Recherches en Lorraine allemande. — Les recherches effectuées en Lorraine allemande ont été moins centralisées et, par suite, moins uniformisées qu'en France.

L'institution des concessions de mines est basée, en Allemagne, sur le droit d'invention; mais il n'est pas indispensable pour l'explorateur de justifier que le gîte est exploitable. L'essentiel pour lui, surtout en cas de concurrence, est d'arriver à démontrer le plus tôt possible l'existence du gîte. Cela fait, l'étude détaillée de la richesse des couches ne présente plus qu'un intérêt assez éloigné, qui ne redevient d'actualité que pour la mise en exploitation des mines ou leur amodiation.

La plupart des recherches ou reconnaissances de la Lorraine sont rapportées dans les trois publications de *Stahl und Eisen*, déjà mentionnées précédemment. Nous y avons puisé les renseignements qui figurent à l'*Annexe* A_6, sauf quelques données obtenues postérieurement aux publications de *Stahl und Eisen*, et notamment trois intéressants sondages de la maison de Wendel, dans le bassin d'Ottange. Nous avons recueilli, en outre, sur les mines en exploitation, nombre de données qui n'ont pas pu trouver place dans le tableau résumé de l'*Annexe* A_6.

Digitized by Google

Région du Luxembourg. — Pour le grand-duché de Luxembourg, c'est à notre collègue de Luxembourg, M. Dondelinger, et à M. Limpach, garde-mines à Rumelange, que nous sommes redevable des renseignements.

Il nous est agréable de reconnaître ici, d'une façon toute spéciale, la grande complaisance et l'empressement qu'ils ont mis à répondre à nos enquêtes.

§ 6. — Principes de la théorie des failles nourricières.

Nous nous proposons maintenant d'expliquer comment la répartition des minerais est réglée d'après les failles et les reliefs.

Sauf à y revenir plus loin et à les justifier par les faits que nous décrirons, nous énoncerons d'abord les principes essentiels de la théorie des failles nourricières.

1° Le minerai de fer a été amené dans le fond de la mer par des fissures de l'écorce terrestre livrant passage à des sources thermales véhiculant le fer principalement à l'état de carbonate. Ce carbonate s'est décomposé dans l'eau de la mer et a donné naissance à un précipité d'oxyde pulvérulent qui a enrichi les sédiments contemporains;

2° Lorsque le dépôt a été abondant, une couche de minerai s'est formée non seulement au voisinage de l'émergence de la source, mais jusqu'à une distance plus ou moins grande de celle-ci, distance qui dépendait non seulement de l'abondance du produit ferrugineux, mais aussi du relief du fond de la mer et des courants.

Le transport du fer s'effectuait à la fois par charriage du précipité ténu et par entraînement des eaux ferrifères non encore décomposées;

3° Sur le rôle des courants d'autrefois, on sera toujours réduit à faire des hypothèses; mais, sur celui des failles d'émergence et sur celui des reliefs, on peut jeter

Digitized by Google

quelque lumière en partant des faits que nous sommes à même d'observer actuellement.

En effet, parmi les failles qui s'étaient ouvertes à l'époque toarcienne, un certain nombre ont joué de nouveau, depuis cette époque ; et nous les retrouvons aujourd'hui, affectant la régularité des dépôts plus récents du bajocien ou du bathonien.

On doit admettre toutefois : 1° que toutes les failles toarciennes ne nous sont pas décelées aujourd'hui par des dérangements observables à la surface du sol ; 2° que les failles qui produisent de tels dérangements n'ont pas forcément existé toutes à l'époque toarcienne ; 3° que toutes les failles toarciennes n'ont pas été nourricières.

Cependant on conçoit que les failles nourricières les plus importantes, autrement dit celles par lesquelles les émissions les plus abondantes ont pu se produire, sont précisément celles qui présentent aujourd'hui les rejets les plus grands.

En effet, ces failles, qui devaient être très franchement ouvertes pour livrer passage aux sources ferrugineuses, ont dû être les premières à se rouvrir dans les terrains de recouvrement, par suite des lignes de moindre résistance qu'elles constituaient dans leur soubassement. Elles nous apparaissent donc aujourd'hui avec des rejets plus ou moins considérables ; ce sont, par exemple, celles :

1° D'Esch-Crusnes (125 mètres à Audun-le-Tiche) ;
2° D'Ottange-Audun-le-Roman (20 à 40 mètres) ;
3° De Neufchef (50 mètres à Neufchef) ;
4° D'Avril (60 mètres à Avril) ;
5° Du Woigot (20 mètres à Briey) ;
6° De l'Orne (30 mètres à Auboué) ;
7° De Rombas (30 mètres à Montois) ;
8° De Bonvillers (60 mètres à Bonvillers).

En ce qui concerne les reliefs que les couches de minerai affectaient au moment de leur dépôt, il faut naturelle-

Digitized by Google

ment être très réservé sur ceux qu'on observe au voisinage *immédiat* des failles, puisque leur rejet s'est grandement modifié depuis l'époque toarcienne. Mais, pour l'*ensemble* d'une région délimitée par deux ou plusieurs failles nourricières, il est légitime de supposer que le relief que nous trouvons aujourd'hui est non pas identique, mais *semblable* à celui de la mer toarcienne. En particulier, les synclinaux et les anticlinaux déjà esquissés au moment du dépôt du minerai n'ont fait que s'accentuer depuis cette époque ;

4° Les émissions ferrugineuses sous-marines étaient réparties le long des failles nourricières, d'une façon que nous ne connaissons pas avec précision. Elles étaient d'importance inégale et irrégulièrement espacées. Chacune d'elles, considérée en particulier, a dû subir des variations d'intensité corrélatives des diverses phases par lesquelles passait la dislocation de l'écorce terrestre. La cessation des émissions marque en même temps la fin de ces dislocations et le début de l'ère bajocienne, dont le calme se traduit par le dépôt uniforme et puissant des marnes micacées (souvent plus de 30 mètres) qui recouvrent toute la formation ferrugineuse.

On peut se demander si des émissions se sont produites au-delà du rivage de la mer toarcienne, dans une région émergée, qui aurait été découpée par une ou plusieurs failles nourricières. Il n'est pas possible de répondre à cette question. Tout ce qu'on peut dire, c'est que, si des dépôts de minerais s'étaient formés sur des terrains émergés, il n'en resterait aucune trace aujourd'hui, par suite des érosions considérables qui ont décapé le lias sur tout le pourtour du gisement.

Il ne peut donc être question ici que des minerais formés sur le toarcien immergé. Leur texture oolithique, indice d'une formation par voie chimique, vient à l'appui de l'hypothèse d'une production de l'oxyde de fer par

Digitized by Google

l'altération du carbonate, qui ne pouvait, en raison de son instabilité bien connue, séjourner longtemps dans les eaux de la mer sans se décomposer.

§ 7. — Premier cas. — Dépot lenticulaire sur soubassement horizontal.

Supposons qu'une faille nourricière FF', sans rejet (*fig.* 1), débouche dans le fond de la mer; si ce fond est plat et si, en dehors de l'agitation ordinaire des eaux, il ne règne aucun courant spécial dans le voisinage de l'émer-

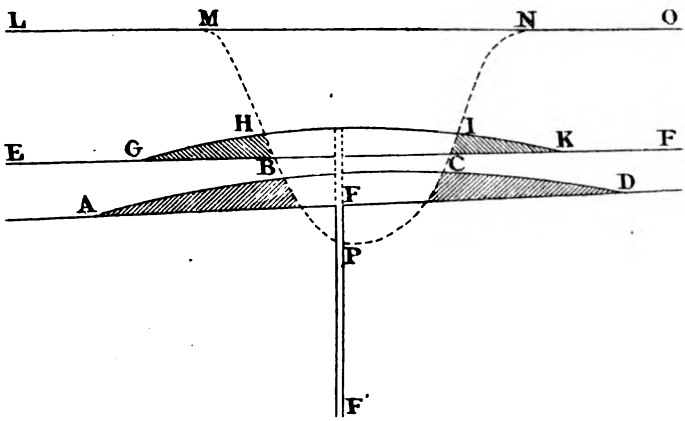


Fig. 1.

gence, le dépôt ferrugineux affectera une forme lenticulaire, telle que ABCD.

La lentille ABCD sera d'autant plus épaisse et d'autant plus étendue que l'émission aura été plus abondante. Si des émissions distinctes et contemporaines ont été suffisamment voisines pour confondre leurs produits, le dépôt, au lieu de former une lentille isolée, affectera la forme d'une nappe continue, présentant des renflements ou

Digitized by Google

étranglements progressifs, et ce n'est qu'à l'extrémité du gisement qu'on retrouvera la terminaison en biseau telle que BA ou CD de la figure. Le flux ferrugineux se déposera rarement à l'état de pureté, attendu qu'il ne fait que se mélanger aux apports ordinaires des eaux de la mer; mais la richesse du dépôt subira une loi de décroissance lenticulaire, si cette expression pouvait être employée.

Après la fin ou le ralentissement de l'émission, la sédimentation pauvre reprenant l'avantage, le dépôt de minerai sera recouvert d'une couche plus ou moins stérile jusqu'en EF. Les dépôts marneux ou calcaires qui séparent les couches de minerai proprement dites ne sont jamais dépourvus de fer, attendu que, même en admettant l'arrêt complet des émissions pendant leur formation, les produits ferrugineux antérieurement constitués étaient partiellement repris par la sédimentation pour s'incorporer aux couches plus récentes.

L'émission ferrugineuse vient-elle à renaître ou à reprendre une plus grande intensité? une seconde couche de minerai GHIK se forme au-dessus de la première, et ainsi de suite.

Supposons que les morts-terrains de recouvrement s'élèvent jusqu'en LMNO; si une vallée de fracture telle que MHBPCIN s'ouvre par la suite et se creuse suivant la direction de la faille nourricière jusqu'au niveau des couches ferrugineuses, la partie centrale des dépôts, qui est la plus épaisse et la plus riche, disparaît, et il ne reste en place que les parties périphériques des lentilles primitives. De là, l'observation, souvent faite dans les travaux de mines exploitées en partant des affleurements à flancs de coteaux, que la puissance et la richesse des couches de minerais s'amoindrissaient au fur et à mesure qu'on s'éloignait de l'axe de la vallée et qu'on pénétrait plus profondément sous les plateaux.

Les mines du bassin de Nancy, toutes en affleurement,

Digitized by Google

sont soumises à cette loi. Elles sont situées en bordure des vallées de la Moselle, de la Meurthe ou de leurs affluents, et leur hinterland est toujours pauvre.

Les vallées de Dudelange et de Rumelange, dans le Luxembourg, nous fournissent aussi des exemples intéressants de ces phénomènes. Dans la première, la formation du versant oriental, moyennement riche dans la vallée même, va en diminuant de puissance et de richesse d'une façon graduelle vers l'Est, jusqu'à devenir à peu près nulle sur les hauteurs de rive gauche de la vallée de la Moselle, faute de failles nourricières de ce côté.

Au contraire, dans le versant occidental de la même vallée, la formation se développe sans interruption jusqu'à la vallée de Rumelange, et augmente de richesse au fur et à mesure qu'on se rapproche de cette dernière vallée, qui s'est ouverte suivant la faille d'Ottange. Il résulte de là que la faille de Dudelange n'a pas été nourricière ou l'a été fort peu; mais, par contre, il n'y a pas de doute que celle d'Ottange l'a été grandement.

La faille de Crusnes a donné aussi des émissions ferrugineuses, notamment celle de la belle couche rouge d'Esch et celle de la couche noire du district d'Aumetz.

La faille de Crusnes-Esch présente cette particularité que des érosions ont enlevé complètement, à hauteur d'Esch, la partie occidentale du gisement qui avait été relevée d'une centaine de mètres. Ce n'est que du côté de l'Est que le gisement, épargné par les agents de dénudation, en raison de son enfoncement relatif, a pu subsister.

La terminaison des couches en biseau, qui se remarque sur la bordure orientale du bassin allemand et luxembourgeois, se retrouve sur la limite occidentale du bassin français. Elle s'observe notamment aux terminus de Gorcy, d'Eton et de Brainville.

Sur la lisière Nord du bassin luxembourgeois, le biseau fait défaut et les minières de ce bassin finissent d'une

Digitized by Google

façon plus ou moins abrupte, par une falaise qui marque la limite des érosions.

§ 8. — Deuxième cas. — Formation des dépots sur soubassements inclinés.

La pesanteur intervient ici pour donner au dépôt lenticulaire, par rapport au point d'émergence, une forme excentrée, telle que ABCD (*fig.* 2), la partie AB d'amont étant moins puissante que la partie CD située en aval.

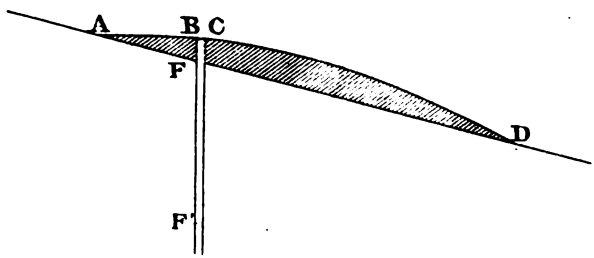


Fig. 2.

Si la pente, au lieu d'être régulière, comme AFD, est variable, les zones d'aplatissement relatif CD, succédant aux parties redressées BC, se trouveront avantagées (*fig.* 3).

Nous donnerons plus loin des coupes de la couche grise qui reproduisent fidèlement cette allure.

La *fig.* 3, dans laquelle nous n'avons figuré qu'une seule faille nourricière, du côté gauche, montre que les synclinaux sont forcément des régions privilégiées pour le rassemblement des dépôts ferrugineux.

Il est clair que si, au lieu de ne figurer qu'une faille nourricière, nous en avions imaginé une autre à droite, le dépôt ferrugineux, qui finit en biseau du côté du point D,

Digitized by Google

se serait développé au-delà de ce point, sur le flanc droit du synclinal, dans les mêmes conditions que sur le flanc

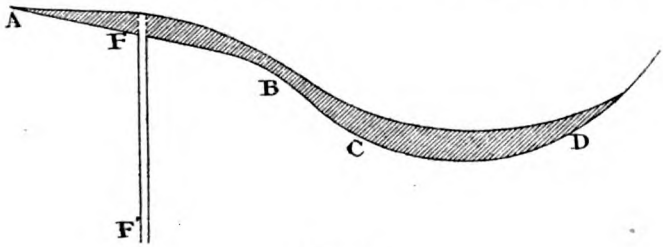


Fig. 3.

gauche (cas du synclinal de Tucquegnieux, entre les failles d'Audun-le-Roman et d'Avril).

§ 9. — Troisième cas.
Formation de dépots sur soubassement rejeté.

Supposons qu'une première couche de minerai AB, formée par une émission autour du point F (*fig.* 4), ait été

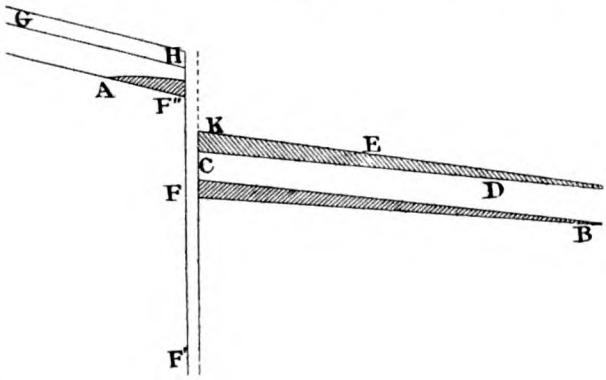


Fig. 4.

recouverte d'un banc stérile, et qu'ensuite la faille ait joué

Digitized by Google

de façon à déterminer un rejet appréciable F″F dans les dépôts existants. Si une nouvelle émission ferrugineuse se fait jour par la faille, elle ne peut former qu'une couche CDEK, localisée uniquement du côté qui a été enfoncé. De l'autre côté, les sédiments ordinaires peuvent continuer à se déposer et former une couche stérile ou pauvre, telle que GH ; mais la zone richement minéralisée ne s'étendra jamais, de ce côté, bien loin de la faille. Ce cas se rencontre : 1° aux failles de Bonvillers et d'Audun-le-Roman, dont le rejet a permis la formation d'une couche rouge confinée dans l'angle affaissé entre ces deux failles ; 2° aux failles de l'Orne et du Woigot (régions de Jœuf et Briey), où l'on voit des couches jaune et rouge, confinées au voisinage de ces failles, tantôt d'un côté, tantôt de l'autre, suivant les affaissements inégaux des lèvres, lors des mouvements de dislocation qui ont successivement affecté la région.

Dans les chapitres suivants, nous allons passer en revue les faits qui viennent à l'appui de cette théorie.

CHAPITRE III.

BASSIN DE LONGWY.

On doit distinguer, avons-nous dit, dans le gisement lorrain, cinq bassins distincts (outre celui de Nancy que nous n'étudions pas), dont les deux extrêmes, situés au Nord et au Sud, sont les plus anciennement connus. Leur description offre par cela même un intérêt assez médiocre, et nous ne nous y appesantirons pas longuement.

Dans le bassin septentrional de *Longwy-Differdange-Villerupt*, des actions de toute nature, physiques, chimiques et dynamiques, ont si profondément modifié l'aspect

Digitized by Google

la nature et l'allure des couches postérieurement à leur dépôt qu'il est extrêmement difficile d'en reconstituer la genèse. Il serait nécessaire, en tous cas, si l'on voulait y parvenir, de pousser beaucoup plus loin que nous ne l'avons fait l'étude de la topographie souterraine.

La Pl. V ne donne les courbes de niveau que de 20 en 20 mètres pour la couche grise, qui n'est pas la plus importante du bassin. Il faudrait baser une étude détaillée de la région sur l'allure de la couche rouge qu'on exploite (avec des calcaires ferrugineux superposés), sur des hauteurs considérables atteignant jusqu'à 7 mètres (mines de Saulnes, Herserange, Hussigny). Pour l'étude d'ensemble des différents bassins que nous avions spécialement en vue, la topographie de la couche grise était la plus intéressante à envisager. Cette couche a été très bien étudiée par nivellements et par analyses, dans les trois bassins de Landres, d'Ottange-Tucquegnieux et de l'Orne, et nous avons pu en établir des coupes d'ensemble aussi exactes que possible. Mais, pour le gisement de Longwy, la topographie figurée sur la Pl. V n'a d'autre prétention que d'indiquer grossièrement l'allure générale du bassin.

En examinant les courbes de niveau, on voit que la direction des couches est à peu près Est-Ouest, avec pendage au Sud. La cote supérieure est atteinte entre Differdange et Belvaux, aux environs de l'altitude 400. Les parties les plus basses qu'on ait exploitées se trouvent à Lexy, cote 270 à 260.

En dessous de cette cote, et dans tout le rentrant délimité par Lexy, Haucourt, Tiercelet et Ville-au-Montois, on est mal fixé sur la consistance de la formation ferrugineuse; il ne serait donc pas inutile d'y faire des travaux de recherche. On n'y a pas été beaucoup encouragé jusqu'à ce jour en raison de l'appauvrissement des hinterlands des mines concédées et de la nature siliceuse de leurs minerais. La contrée est d'ailleurs mal desservie

Digitized by Google

par les voies de communication, et aucun haut-fourneau n'y est établi (*).

Nous proposons d'établir trois subdivisions dans le groupe de Longwy ;

1° Subdivision occidentale, à l'Ouest de la faille de Longlaville ;

2° Subdivision centrale, entre les failles de Longlaville et de Godbrange ;

3° Subdivision orientale, entre la faille de Godbrange et celle de Crusnes.

§ 1. — Subdivision occidentale. — Mines de Lexy et de Mont-Saint-Martin.

Il n'y existe qu'une couche exploitable, la grise.

Ci-dessous deux coupes prises dans la mine de Lexy.

TOIT DE LA FORMATION.

MARNES MICACÉES. Formation ferrugineuse constituée comme suit :	PUITS n° 1	PUITS n° 2
Marnes ferrugineuses, avec mine friable	0m65	0m65
Marne bleue ferrugineuse	1 »	1 »
Intervalle schisto-marneux avec mélange de mine	3 90	3 10
Mine rouge friable, très pauvre et bancs schisto-ferrugineux	0 95	0 65
Mine grise, avec rognons pauvres, à trier	*3* »	*2 50*
Mur de la formation		

ANALYSE DU MINERAI.

Fer	34,52
Chaux	2,46
Silice	23,40
Alumine	7,43
Phosphore	0,58

(*) Il a été fait tout récemment (1901) un sondage à Baslieux qui a démontré que la puissance de la formation ferrugineuse diminuait sensiblement. Elle n'est plus que de 15 à 16 mètres, comprenant trois couches de minerai bien distinctes.

Digitized by Google

La coupe suivante est prise dans la mine de Mont-Saint-Martin (puits n° 10) :

Alternance de bancs calcaires et de mine très siliceuse	2,30
Banc coquillier	0,60
Mine rouge friable très pauvre et banc schisto-ferrugineux	1,60
Banc marneux coquillier	0,30
Mine grise, dont le mur est formé par un grès sableux	1,70

ANALYSE DU MINERAI.

Fer	41,3
Chaux	3,34
Silice	17,83
Alumine	7,10
Phosphore	0,60

Dans les mines de Mexy et de Mont-de-Chat qu'on exploite, entre les failles de Mont-Saint-Martin et de Longlaville, les conditions sont à peu près les mêmes, sauf que la teneur en chaux est un peu plus élevée (7 à 8 p. 100 dans le minerai de Mont-de-Chat).

Le fait le plus saillant de ces exploitations, c'est l'amincissement de la formation et l'absence de toute couche rouge exploitable.

§ 2. — Subdivision centrale. — Mines de Saulnes et Herserange.

Au contraire, à l'Est de la faille de Longlaville, la couche supérieure apparaît et augmente graduellement de puissance, de façon à donner dans la mine de Saulnes, avec le calcaire ferrugineux du toit, des chantiers de 7 mètres de haut. En dessous de cette couche exceptionnellement puissante, on trouve, 4 mètres plus bas, une

Digitized by Google

couche jaune de 2 mètres et, en dessous encore, la couche grise. Ces deux couches sont séparées par un banc calcaire stérile de $0^m,50$ environ. La première mérite une mention spéciale. Elle est exploitable, près de la frontière franco-luxembourgeoise, sur $1^m,90$ d'épaisseur, avec une composition de 35 à 40 de fer, 2 de chaux et 14 de silice. On l'exploite aussi, en Luxembourg, dans les mines de la Madelaine et de la Sauvage, où elle est réunie à la grise. L'intervalle qui la sépare du mur de la rouge est de 10 mètres en moyenne.

Même consistance à peu près pour la formation exploitée dans les mines d'Herserange et de Moulaine, sauf qu'on n'y trouve pas de couche jaune exploitable. L'épaisseur des chantiers de la couche rouge y varie de 4 à 7 mètres. On en retire un mélange de mine fine, sans cohésion, et de petits bancs de calcaire ferrugineux, dans la proportion de 15 à 40 p. 100 de mine et 85 à 60 p. 100 de calcaire (dans la mine de Saulnes, on obtient souvent 60 p. 100 de mine fine). La mine fine contient :

Fer.....	de	35 à 40
Chaux.....	de	6 à 10
Silice.....	de	10 à 14

et les calcaires:

Fer.....	de	17 à 27
Chaux.....	de	20 à 35
Silice.....	de	6 à 9

§ 3. — Subdivision orientale. — Mines d'Hussigny et de Villerupt.

C'est dans cette région que se trouvent les minières d'Hussigny, ainsi que la mine de Micheville dont nous avons fait connaître précédemment les coupes et les

Digitized by Google

analyses. Outre la couche rouge, la grise et la noire sont aussi exploitables dans la région d'Hussigny.

Pour la région luxembourgeoise, voici ce qu'on peut dire de la couche noire. Elle finit à très peu de distance à l'Ouest de la faille de Godbrange. Son plus grand développement est à l'Est de la faille ; elle diminue de valeur à mesure qu'on s'en éloigne. A Buschenthal-Obercorn, elle a une puissance de 2 mètres avec la composition suivante : fer, 40 ; chaux, 4 ; silice, 16.

La couche rouge, qui atteint son apogée à Saulnes et Hussigny, décroît vers Villerupt. Dans la concession de ce nom, elle ne dépasse guère 2 mètres de puissance, et nécessite du triage. Dans le Nord de la concession de Crusnes, au Sud de celle de Villerupt, un puits d'aérage, qui a trouvé le mur de la couche grise à l'altitude 337,93, a reconnu les couches rouge, grise, noire et verte, avec les épaisseurs suivantes :

Couche rouge.....	1,93	exploitable avec 4 bancs calcaires intercalés, mesurant ensemble 0,53.
Calcaire gris marneux.....	1,11	inexploitable.
Couche grise.....	1,71	dont 0,75 au toit d'assez bonne qualité, le reste marneux.
Calcaire très marneux.....	2,90	
Couche noire.....	1,20	minerai brun, marneux, pauvre.
Calcaire gris dur.....	0,20	
Couche verte.....	1,13	avec 2 rognons de calcaire, contient beaucoup de pyrite de fer, inexploitable.
TOTAL.....	10,18	

Le sondage H, dans la concession de Fillières, a donné :

	Epaisseur	Fer	Chaux	Silice	Alumine
Couche rouge....	1,72	37	8	17	6
Couche grise.....	1,72	33	9	19	8
Couche verte.....	1,15	35	10	16	10

Digitized by Google

La teneur élevée de ces minerais en silice se retrouve dans la plupart des recherches des environs; d'où l'opinion généralement admise que le prolongement méridional du bassin de Longwy est siliceux. Nous verrons plus loin que les sondages de Bazailles (FG) et de Ville-au-Montois (FB) ne sont pas de nature à modifier cette appréciation (*).

Entre Fillières et Errouville, les courbes 260 et 240 dessinent un synclinal secondaire, orienté vers l'Ouest, dans lequel deux sondages I et K sont tombés. La couche grise de ces deux sondages est tout à fait remarquable et dénote un enrichissement exceptionnel. En effet, on a :

Au sondage I, une puissance de $2^m,40$, avec : fer, 41; chaux, 4; silice, 15;

Et au sondage K, $3^m,80$, avec : fer, 37; chaux, 8; silice, 14.

Plus au Sud, sur le revers du synclinal, le sondage M n'a donné qu'une couche très médiocre de $2^m,80$, avec : fer, 28; chaux, 9; silice, 18.

§ 4. — Failles nourricières du bassin.

Pour les raisons déjà développées précédemment, il est difficile de préciser les circonstances de la genèse des minerais dans le bassin de Longwy. D'une façon générale, la détermination des points d'émergence sera d'ailleurs un problème toujours très difficile à résoudre pour les raisons suivantes :

Les cheminées qui servaient, le long des failles, à l'ascension des eaux chargées de fer, sont relativement peu nombreuses et peu étendues; leurs emplacements occupent

(*) Le sondage de Baslieux (FK) l'a confirmée de nouveau récemment.

Digitized by Google

donc un espace tout à fait restreint comparativement au développement des failles. Ainsi, par exemple, la faille d'Audun-le-Roman-Ottange est connue sur une longueur de plus de 20 kilomètres. En supposant qu'elle ait donné naissance à dix émissions occupant chacune un espace de 10 mètres en moyenne, il faudrait des circonstances exceptionnellement favorables, et qui ne se rencontreront peut-être jamais dans la pratique, pour qu'on puisse observer une de ces émergences. Il paraît bien évident cependant que, si l'on pouvait, par des travaux de mines, rejoindre une des cheminées ascensionnelles, on ne manquerait pas d'être frappé par l'aspect particulier des dépôts y contenus, qui ont dû s'effectuer dans des conditions de chaleur et d'agitations exceptionnelles. Ce n'est que le hasard qui pourrait amener une pareille rencontre, puisque, sur plus de 20 kilomètres, il n'y aurait en tout qu'une centaine de mètres occupés par les cheminées ascensionnelles. D'ailleurs, il y a une raison qui s'oppose à ce que les failles soient explorées souterrainement. Elles sont accompagnées d'une quantité d'eau tellement considérable que les exploitants de mine cherchent à les éviter le plus possible.

Les régions où l'on s'est le plus approché jusqu'ici des failles nourricières sont celles d'Audun-le-Tiche et d'Homécourt ; mais, dans l'un comme dans l'autre cas, on n'a pas percé dans la faille principale. On n'a fait que recouper des diaclases parallèles ou perpendiculaires.

En ce qui concerne le bassin de Longwy, on y connaît une faille importante, celle de Differdange-Godbrange, qui occasionne un rejet de 35 mètres environ du côté de l'Ouest. Elle n'a malheureusement pas pu être explorée en territoire français, la partie occidentale de la concession de Godbrange qu'elle traverse étant sous l'eau. L'opinion des exploitants, basée sur les recherches faites, il y a environ vingt-cinq, ans en vue de l'obtention de la concession, est

Digitized by Google

plutôt contraire à l'idée d'un enrichissement des couches au voisinage de la faille. On semble être d'accord pour estimer que les couches les plus riches sont situées dans la région comprise entre Hussigny, Belvaux et Redange

La coupe des minières d'Hussigny, donnée au chapitre Ier, qui dénote l'existence d'une formation ferrugineuse de 30 mètres, et celle des mines de Saulnes, qui est à peu près équivalente, laisseraient supposer d'après cela que les émissions ferrugineuses étaient situées, d'une part, entre Redange et Differdange, et, d'autre part, entre cette dernière localité et Saulnes.

On n'a pas encore signalé de failles passant entre ces localités ; mais il se peut que les ouvertures ayant livré passage aux sources n'aient pas donné lieu ultérieurement à des rejets appréciables. Deux faits permettent de regarder comme assez plausible l'hypothèse de deux failles nourricières, situées de part et d'autre de la faille de Godbrange :

1° A l'Est de cette dernière, sur la limite orientale de la concession d'Hussigny, on a trouvé des fissures largement ouvertes, qui absorbent les eaux circulant dans les travaux du voisinage. C'est dans cette région de la mine que la couche exploitée est la plus belle et donne des chantiers de 6 mètres de hauteur;

2° A l'Ouest de Godbrange, au hameau de la Sauvage, il existe une crevasse qui a livré passage autrefois à une source incrustante ayant formé un dépôt de tuf considérable. C'est encore dans cette région que la couche rouge et les calcaires ferrugineux réunis donnent des chantiers de 6 à 7 mètres.

Les exploitations à ciel ouvert, situées à proximité de la faille de Godbrange, dans le Luxembourg, n'ont pas révélé de différence de composition de part et d'autre de l'accident.

La formation ferrugineuse présente, à l'Est comme à

Digitized by Google

l'Ouest, la coupe ci-après :

0m,50	Calcaire compact.
2 50	*Calcaire ferrugineux supérieur.*
3 00	Calcaire marneux stérile.
4 00	*Calcaire ferrugineux inférieur.*
3 00	Stérile.
2 00	*Couche rouge.*
4 50	Calcaire marneux un peu ferrugineux.
2 20	*Couche grise.*
1 80	Calcaire marneux stérile.
2 00	*Couche noire.*
TOTAL.. 25m,50	

En résumé : 1° l'augmentation de richesse de la couche rouge à la Sauvage et à Hussigny ;

2° L'existence de la couche noire dans la dernière de ces localités et celle de la couche jaune dans la première (Voir délimitation de la Pl. V);

3° L'amincissement en biseau de la formation vers l'Est, à Villerupt, et vers l'Ouest, à Longlaville, sont autant d'arguments qui militent en faveur de l'hypothèse des deux émissions dont il vient d'être question.

Si on considère spécialement la couche grise, on se trouve, en outre, amené à faire intervenir les failles de Mont-Saint-Martin et de Crusnes.

La première a donné naissance à la vallée de la Chiers, qui est profondément encaissée dans sa partie située au Sud de Longwy. Il en est tout autrement au Nord, où les érosions ont ouvert très largement la plaine entre Pétange et Halanzy, et ont détruit complètement le gîte.

Une émission ferrugineuse a pu exister sur le trajet de la faille, dans le triangle formé par Longwy, Halanzy et Pétange, sans qu'aucune trace en subsiste de nos jours.

Un raisonnement analogue s'applique à la faille de Crusnes. Si l'on suppose qu'une émission ferrugineuse a existé autrefois près de l'emplacement actuel de la ville

Digitized by Google

d'Esch, on est dans l'impossibilité de la déterminer aujourd'hui.

Les érosions qui ont décapé le gîte dans le Luxembourg, sur le passage des failles de Mont-Saint-Martin et d'Esch, ne laissent donc place qu'à des suppositions.

Ce n'est que dans la région Sud-Est du bassin de Longwy qu'on peut reconstituer d'une façon plus précise l'emplacement d'un groupe d'émissions d'où seraient sortis les minerais de la région de Bréhain, Errouville, Fillières.

Nous avons relaté précédemment les résultats satisfaisants donnés par les sondages I et K. Si on en rapproche ceux de la région située à l'Est de la faille (région de Crusnes-Aumetz), on arrive à conclure que des sources ferrugineuses se trouvaient sur la faille de Crusnes, non loin de l'emplacement de cette localité. La faille devait être en ce point très franchement ouverte puisqu'elle a pris ultérieurement un rejet d'une centaine de mètres.

A l'Est comme à l'Ouest de la faille, les minerais sont siliceux en couches inférieures (verte, noire ou brune). Cela tendrait à prouver que les deux lèvres de la cassure étaient peu dénivelées à cette époque, puisque, d'un côté comme de l'autre, les couches se constituaient d'une façon identique.

Au contraire, la couche grise est complètement différente d'une lèvre à l'autre. Elle est siliceuse et peu épaisse dans la direction du Sud-Ouest (Crusnes-Fillières); elle n'a plus que $1^m,62$ au sondage H, et, au sondage J, elle n'est plus discernable, tandis qu'aux points G et K elle a, au contraire, $3^m,30$ et $3^m,80$ avec 37 p. 100 de fer.

Du côté de l'Est (région de Crusnes-Aumetz), elle est puissante et calcaire; aux points E et L, elle a $3^m,24$ et $3^m,42$; elle croît jusqu'à 6 et 8 mètres vers le Sud-Est, c'est-à-dire dans la région située en contre-bas du point d'émergence.

Digitized by Google

Il résulte de là que la faille, en jouant de nouveau pour former la couche grise, a donné lieu à un rejet vers l'Est.

L'effet inverse a dû se produire à l'époque de la couche rouge, attendu qu'elle est meilleure à l'Ouest qu'à l'Est.

§ 5. — Considérations générales sur les minerais du bassin de Longwy.

D'une façon générale, le bassin de Longwy ne donne donc que des mines siliceuses, sauf dans les couches de calcaires ferrugineux, qui ont un autre grave défaut, celui d'être pauvres en métal.

Les analyses suivantes, empruntées à la notice de M. l'Ingénieur des mines Dondelinger (Exposition Universelle de 1900), montrent que les couches du district de Differdange, en Luxembourg, méritent les mêmes critiques.

DISTRICT DE DIFFERDANGE.

DISTRICT DE DIFFERDANGE		FER	CHAUX	SILICE	ALUMINE	PHOSPHORE
Calcaires ferrugineux	Mine fine et friable..	41,40	6,32	11,03	5,79	0,79
	Calcaires ferrugineux compacts.....	18,17	33,32	8,48	2,28	0,53
Couche rouge.....		37,71	6,94	14,76	5,78	0,80
Couche grise.....		40,10	5,20	15,68	6,63	0,83
Couche noire.....		39,20	5,30	16,10	6,43	0,81

Les minerais du bassin de Longwy conviennent parfaitement pour la fabrication des fontes de moulage ; mais ils sont trop silicieux pour la production de la fonte Thomas. Les aciéries étaient donc obligées jusqu'ici, pour obtenir un produit convenable, d'augmenter la proportion de la chaux, en faisant entrer dans leurs lits de fusion une quantité considérable de calcaires ferrugineux ; malheureusement, la faible teneur en fer de ceux-ci abaissait beaucoup le rendement du haut-fourneau.

Digitized by Google

Pour y remédier, les maitres de forges français ont dû acheter dans le Luxembourg des minerais riches et non siliceux, tels que ceux d'Esch et de Rumelange, dont ci-dessous la composition :

	Fer	Chaux	Silice	Alumine	Phosphore
Couche rouge triée d'Esch .	40,98	7,40	8,41	4,85	0,77
Couche jaune de Rumelange.	36,03	15,60	7,50	5,44	0,85
Couche grise de Rumelange.	33,24	16,34	6,84	5,23	0,80

§ 6. — Historique rapide des travaux de recherches, de 1883 a 1899.

C'est pour répondre à ce besoin de minerais riches et calcaires que les métallurgistes ont procédé à une première série de recherches, en 1883, dans le bassin de l'Orne. La raison qui leur avait fait choisir cette région était l'existence, en Lorraine annexée, des mines de Moyeuvre, proches de la frontière, qu'on connaissait depuis longtemps comme très riches en bons minerais.

Mais, si les mines de l'Orne convenaient assez bien, en raison de leur situation topographique, aux usines des environs de Nancy, elles étaient moins bien situées pour celles du groupe de Longwy. Des recherches qui auraient permis de découvrir un gisement calcaire au Nord de celui de l'Orne auraient donc eu une importance décisive pour ces usines, qui se seraient trouvées ainsi moins éloignées de leurs matières premières.

Pour quelles raisons et par suite de quelles circonstances malheureuses les sondages de Sancy, Trieux et Avril, qui furent exécutés, en 1883, au Nord de la faille d'Avril, furent-ils considérés comme négatifs, c'est ce que nous expliquerons un peu plus loin. Toujours est-il que ce n'est que dix ans plus tard qu'un groupe d'explorateurs eut l'idée de recommencer, à Saint-Pierremont,

Digitized by Google

une nouvelle tentative, qui fut cette fois couronnée de succès. Ce fut le signal d'une nouvelle campagne de recherches très active qui amena la découverte du bassin de Tucquegnieux, en 1894-1896.

Progressant de l'Est à l'Ouest, la série des sondages de recherches fut poussée jusqu'à la voie ferrée de Nancy à Longwy et même au delà. C'est de cette deuxième série de travaux que résulta la découverte du bassin de Landres, en 1895-1898.

Les concessions instituées à la suite de ces recherches, qui ne comportent pas moins de quatre-vingt-neuf sondages pour les seuls bassins de Tucquegnieux et de Landres, ont fait l'objet de décrets datant de 1899 et 1900.

Si nous suivions l'ordre chronologique, nous devrions donc décrire tout d'abord le bassin de l'Orne, puis celui de Tucquegnieux, et en dernier lieu celui de Landres.

Le procédé inverse nous paraît plus commode pour la clarté de l'exposition. Nous allons donc décrire successivement :

1° Le bassin de Landres ;

2° Le bassin de Tucquegnieux ;

3° Le bassin de l'Orne.

Nous utiliserons, pour cela, la topographie souterraine de la Pl. V et différentes coupes d'ensemble suivant les directions marquées par les chiffres romains I, II, III, etc., jusqu'à XII sur cette même planche.

Nous croyons utile, à ce propos, de faire remarquer une fois pour toutes que les régions situées dans le voisinage immédiat des failles, et surtout des croisements de failles, étant très disloquées et très dérangées, il ne faut pas s'attendre à ce que la représentation qui en est donnée dans notre carte et dans nos coupes soit d'une exactitude absolue. C'est un fait bien connu que les failles qui découpent la formation ferrugineuse sont non pas simples,

Digitized by Google

mais multiples ; les cassures, sensiblement parallèles, qui font partie du même accident, occasionnent des rejets successifs, de même sens ou de sens inverse, qui donnent aux surfaces de séparation des couches une allure en marche d'escalier, qu'on observe surtout sur le flanc des vallées, où les éboulements ont encore accentué le phénomène.

Quoi qu'il en soit, nous ne considérons, dans chaque zone de cassure, que la direction mère, et nous faisons abstraction des rejets partiels qui se produisent dans le voisinage immédiat de l'accident.

Enfin, une dernière remarque qui explique la grande régularité de la distribution de la couche grise. Les ouvertures par lesquelles se produisaient les émissions ferrugineuses dans les premiers temps de la formation n'offraient que des dénivellations peu importantes. La nature plastique des formations keupériennes et liasiques constituant la partie supérieure de l'écorce terrestre à cette époque était, en effet, compatible avec des phénomènes de plissement et de simple crevassement ; tandis que plus tard, sous l'influence de mouvements orogéniques répétés, et en raison de la nature cassante des terrains de l'oolithe, les assises du bajocien et du bathonien se sont disloquées avec des rejets assez considérables. Les dénivellations, au voisinage des failles, n'ont donc acquis une certaine importance qu'après les dépôts ferrugineux.

Digitized by Google

CHAPITRE IV.

BASSIN DE LANDRES.

---

§ 1. — Coupes longitudinale et transversale du bassin.

On se rendra compte de la consistance de ce bassin en examinant les courbes de niveau de la Pl. V et les coupes III et IV de la Pl. XI.

La faille de Bonvillers est celle qui a livré passage aux émissions ferrugineuses. Celles-ci étaient probablement localisées en grande partie à l'extrémité méridionale de la faille, près du point CH. Si l'on fait abstraction, pour le moment, de la coulée qui descendait sur Mairy, dans le bassin de Tucquegnieux, le minerai du bassin de Landres, formé par ces émergences, était entraîné de préférence le long de la pente du fond de la mer dans la direction du Sud-Ouest. La terminaison de la couche en biseau est visible aux sondages de Dommary (CO) et d'Eton (FA). A ce dernier, on ne trouve plus qu'une couche de $2^m,24$ contenant 30 de fer, tandis que, dans toute la région concédée, l'épaisseur de la couche oscille entre 5 et 7 mètres, et la teneur en fer entre 40 et 42 p. 100.

L'aplatissement d'Amermont correspond à une surépaisseur qui porte la puissance de la couche à $7^m,21$ (Voir coupe III, Pl. XI). Le comptage de la hauteur des couches n'ayant de valeur qu'autant que l'analyse des différents bancs a été faite d'une façon détaillée, nous croyons utile de reproduire ci-dessous les analyses des différentes carottes retirées du sondage BW.

Digitized by Google

COMPOSITION DE LA COUCHE GRISE DU SONDAGE D'AMERMONT (BW).
(*Epaisseur totale de la couche*, 7m,21.)

DÉSIGNATION des carottes	HAUTEUR DES CAROTTES		ANALYSES				
Numéros d'ordre	battues	retirées	Fer	Chaux	Silice	Alumine	Phosphore
	m.	m.					
53	0,30	0,17	40,60	8 »	7,20	6,72	0,639
54	0,30	0,18	41,44	7,20	7 »	7,21	0,683
55	0,28	0,24	44,10	5,08	6,60	7,15	0,711
56	0,33	0,33	42 »	6,80	6,30	6,49	0,822
57	0,22	0,22	42,19	6,28	6,30	6,33	0,667
58	0,33	0,32	44,99	4,28	7,04	6,77	0,617
59	0,30	0,25	45,13	4,08	6,60	7,26	0,666
60	0,34	0,28	45,55	3,68	6,28	6,52	0,640
61	0,30	0,21	40,23	11,28	6 »	6,46	0,670
62	0,32	0,32	44,01	7,28	5,92	7,04	0,639
63	0,30	0,28	39,48	8,88	6,80	7,59	0,556
64	0,35	0,25	42,89	4,80	7,16	7,20	0,606
65	0,28	0,11	31,69	18,08	6,24	7,46	0,572
			45.64	5,28	6,80	7,90	0,733
66	0,30	0,29	26,29	24,68	5,10	6,43	0,417
67	0,38	0,37	41,63	6,48	6,08	7,07	0,695
68	0,30	0,29	43,73	4,08	6 »	7,51	0,556
69	0,38	0,37	41,91	8,68	5,18	6,39	0,430
70	0,40	0,40	40,09	8,40	6 »	7,53	0,806
71	0,37	0,37	35,19	11,92	6,64	7,39	0,778
72	0,32	0,31	38.36	11,28	5,84	7,73	0,528
73	0,38	0,35	34,35	13,76	6,46	7,14	0,455
74	0,47	0,47	32,34	16,08	6,60	7,06	0,511

Digitized by Google

Altitude du mur de la couche : 33m,22; profondeur du mur : 225m,92.

La coupe IV montre la répartition transversale des minerais dans le synclinal, et leur disparition sur l'anticlinal de Norroy. La limite méridionale du bassin exploitable coïncide, en réalité, avec la naissance de l'anticlinal Norroy-Gondrecourt, dont les courbes de niveau de la Pl. V montrent nettement l'allure.

La limite septentrionale du bassin n'est pas formée par un anticlinal ; aussi la formation ferrugineuse se continue-t-elle de ce côté bien au-delà de la zone concédée, mais avec une teneur en fer peu élevée et une proportion de silice qui ôte toute valeur aux minerais. C'est ainsi, par exemple, que la couche grise a la composition suivante, à Bouvigny, Avillers, Domprix, Higny.

COMPOSITION DE LA COUCHE GRISE.

SONDAGE	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
Bouvigny (EB).....	2m,15	26	6	42
Avillers (EN).....	1 ,62	24	9	34
Domprix (CU).....	3 ,40	21	11	31
Higny (EF).....	4 ,66	24	12	30

La couche grise est donc inexploitable dans ces différents points. Le flux ferrugineux qui y parvenait, par la dispersion en éventail du produit des émergences de Landres, était en trop faible quantité relativement à l'apport de matières pauvres par la sédimentation ordinaire. Cet apport consistait à l'époque en sable quartzeux à peu près pur ; c'est ce qui explique la proportion de silice de 30 à 40 p. 100 dans la couche. L'élément siliceux n'étant pas incorporé chimiquement au minerai et s'y trouvant simplement à l'état de mélange, il en résulte que les produits sont d'une grande friabilité.

Au terminus d'Eton, c'est par défaut de matière ferru-

Digitized by Google

gineuse que la couche s'amincit en même temps qu'elle s'appauvrit ; dans toute la région de Landres, Dommary, au contraire, elle est formée à peu près exclusivement par le minerai seul.

L'allure de la couche, en pente continue depuis la cote 120 environ jusqu'à 0 à Dommary, s'accorde avec ce fait que les minerais purs sont distribués, suivant une zone allongée, dans le sens de la plus grande pente.

La différence de 120 mètres qui existe aujourd'hui dans les niveaux de la couche, entre les deux points extrêmes de Mont et de Dommary, n'est pas évidemment celle qui existait au moment du dépôt ; la pente était alors moins forte ; elle s'est augmentée lors des mouvements postérieurs.

§ 2. — Faille nourricière de Bonvillers.

Aujourd'hui, la faille de Bonvillers montre, sur sa lèvre occidentale, le bathonien inférieur à un niveau plus élevé que le bathonien moyen sur sa lèvre orientale, ce qui correspond à un rejet d'une cinquantaine de mètres vers l'Est. Si on examine les courbes de niveau (Pl. V) de la couche grise, de part et d'autre de la faille, on constate que la dénivellation est en concordance avec cette observation. Il n'y a qu'à comparer, d'autre part, les coupes des sondages CR et DH, d'une part, et CS, de l'autre (Pl. X), pour voir combien est sensible la différence de composition de la formation ferrugineuse de part et d'autre de la faille.

Faille de Norroy-le-Sec. — Il convient de rattacher à la faille de Bonvillers la faille de Norroy, qui se relie elle-même à l'anticlinal de Norroy-Gondrecourt. Elle a dû

Digitized by Google

être nourricière aussi, mais moins abondamment que celle de Bonvillers. Car, si le sondage CF est excellent, le sondage DA est médiocre.

A CF, on trouve $5^m,80$ de couche grise (Fe, 41 ; CaO, 12 ; SiO^2, 6), et, à DA, on ne trouve que $1^m,80$ avec Fe, 33 ; CaO, 14 ; SiO^2, 6.

Le rejet de la faille de Norroy dans le voisinage de cette localité est inverse de celui de la faille Bonvillers ; il paraît être également un peu plus faible.

Cet abaissement inverse explique l'allure des courbes 80 et 100, dont l'écartement grandit de plus en plus de part et d'autre de CE et CF, au fur et à mesure qu'elles se rapprochent de la faille.

Cette irrégularité dans l'allure du mur de la couche est la conséquence des mouvements que le sol a subis postérieurement au dépôt du minerai. Ils ont contribué à refouler davantage vers le Sud-Ouest l'anticlinal de Norroy-Gondrecourt, et, par contre-coup, ont altéré quelque peu la régularité du synclinal adjacent, notamment près du sondage de Dommary (CO), où la courbe 20 dessine, dans la direction de l'Ouest, un crochet qui peut surprendre à première vue.

§ 3. — Couches accessoires dans le bassin de Landres. Couche noire de Xivry-Circourt.

Dans le bassin de Landres proprement dit, si riche en couche grise, les couches inférieures (brune, noire, verte) sont insignifiantes et absolument inexploitables. Il en est de même des couches supérieures (couches jaune, rouge, et calcaire ferrugineux).

Dans les nombreux sondages faits au Nord-Ouest du bassin, et notamment dans les environs de Domprix, Preu-

Digitized by Google

tin et Xivry-Circourt, on a trouvé, au contraire, en dessous de la couche grise, une ou deux couches, qui seraient la brune, la noire ou la verte. (Il est difficile de bien distinguer ces différents horizons, les bancs étant absolument privés de fossiles et les minerais se présentant constamment avec un même aspect brun verdâtre.)

Au Sud-Ouest d'une ligne passant par Avillers et Réchicourt, aucun sondage n'a donné de bons résultats, ainsi que le montre le tableau suivant :

DÉSIGNATION DES SONDAGES	ÉPAISSEUR des couches (noire ou verte)	FER	CHAUX	SILICE
Houdelaucourt (BY)	1m,80	19	10	34
Bouvigny (EB)	1 ,35	20	6	43
Bouligny (CD)	2 ,55 1 ,50	26 26	4 8	44 35
Baroncourt (CA)	3 ,80 0 ,45	16 23	14 4	40 46

Au sondage d'Avillers (EN), on commence à rencontrer une formation plus riche, savoir :

Couche noire : 5m,22.

$$Fe\ 28 + CaO\ 2 + SiO^2\ 37.$$

Couche verte : 1m,00.

$$Fe\ 26 + CaO\ 3 + SiO^2\ 27.$$

Au sondage d'Avillers (CM), on trouve une couche (verte ou noire?) de 1m,69 avec 40 de fer et 24 de silice.

Enfin la région de Domprix, Preutin et Xivry-Circourt est caractérisée par les résultats suivants :

Digitized by Google

DÉSIGNATION DES SONDAGES	ÉPAISSEUR DES COUCHES (noire, verte)	FER	CHAUX	SILICE
Xivry-Circourt (EO)	4m,66	34	3	27
Domprix (ET)	1 ,20 0 ,99	38 35	3 11	21 8
Domprix (CU)	3 ,83 1 ,30	39 31	4 12	17 17
Preutin (EP)	2 ,86 2 ,87	26 39	7 5	38 19
Xivry-Circourt (EE)	3 ,21 2 ,62	33 38	5 5	27 20
Xivry-Circourt (EU)	1 ,70	40	4	16
Higny (EF)	3 ,00 0 ,61	Non analysés		
Preutin (ED)	3 ,01	30	9	26

Hypothèse d'une faille nourricière entre la vallée de la Pienne et la vallée de la Crusnes. — Si on envisage spécialement les sondages dans lesquels la teneur en fer s'élève à 38 et 40 p. 100, c'est-à-dire ET, CU, EP, EE, EU, on remarque qu'ils sont distribués suivant une zone allongée du Nord-Nord-Est au Sud-Sud-Ouest de la cote 140 à 80.

Il est donc probable que la minéralisation de cette région dépend d'une faille nourricière située en amont de la courbe 140. Les émissions ferrugineuses provenant de cette faille ont dû être faibles pendant la période de la formation de la couche grise. Cette dernière couche est, en effet, inexploitable dans la région considérée ; il est néanmoins intéressant de remarquer que c'est encore aux sondages ET et EU qu'elle atteint sa richesse maximum.

Ci-dessous le tableau des résultats donnés par les sondages de la région, en couche grise.

Digitized by Google

DÉSIGNATION DES SONDAGES	ÉPAISSEUR DE LA COUCHE GRISE	FER	CHAUX	SILICE
Xivry-Circourt (EO)	2m,09	19	12	43
Domprix (ET)	7 ,16 1 ,45	28 35	5 6	32 25
Domprix (CU)	3 ,40	21	11	31
Preutin (EP)	5 ,34	20	17	18
Xivry-Circourt (EE)	4 ,11	22	6	44
Xivry-Circourt (EU)	1 ,64 1 ,85	25 35	7 4	40 25
Higny (EF)	4 ,66	24	12	30
Preutin (ED)	6 ,89	19	30	15

Nous verrons plus loin que certains faits topographiques nous conduisent à admettre l'existence d'une faille dite de Joppécourt, entre Boismont et Mercy-le-Haut.

Sous Domprix, où les flux ferrugineux émis par les failles de Bonvillers et de Joppécourt ont dû se rejoindre, la formation est extrêmement épaisse ; car, en dehors des couches mentionnées aux deux tableaux qui précèdent, on y a remarqué une épaisseur de 7m,68, occupant le niveau de la couche jaune et contenant en moyenne :

$$Fe : 19 ; \quad CaO : 26 ; \quad SiO^2 : 30,$$

avec des bancs beaucoup plus riches, où l'on remarque des teneurs de 27 à 31 en fer.

(Une remarque du même genre est à faire pour le sondage CD de Bouligny, où une couche située au-dessus de la couche grise a une puissance de 5m,20, dont on retirerait, par triage, au moins 3 mètres d'un produit contenant 35 de fer et 12 de silice.)

Ces deux sondages sont situés sur la région limite de la superficie exploitable, où l'on observe, comme nous le montrerons plus loin, un surépaississement très notable de la zone minéralisée.

Digitized by Google

§ 4. — Région restant a explorer.

Il resterait encore à explorer, aujourd'hui, pour compléter la reconnaissance du bassin de Landres, la région comprise entre Xivry-Circourt et la vallée de la Crusnes, en dessous de Bazailles. Il est très probable que les couches noire ou verte y existent dans des conditions à peu près identiques à celles qui se rencontrent dans la région de Xivry-Circourt, car les sondages FB et FG de Bazailles et Ville-au-Montois, placés plus au Nord, ont donné les résultats que voici :

Sondage de Ville-au-Montois (FB), couche noire ou verte :

Epaisseur : $2^m,17$.

Fer : 33; Chaux : 5; Silice : 20.

Sondage de Bazailles (FG), couche noire ou verte :

Epaisseur : $1^m,75$.

Fer : 38; Chaux : 5; Silice : 12.

La couche grise de ces deux sondages est caractérisée par les données ci-après :

Sondage FB : $4^m,16$.

Fer : 38; Chaux : 3; Silice : 21.

Sondage FG : $3^m,85$.

Fer : 37; Chaux : 4; Silice : 23.

Nous ne citerons que pour mémoire deux sondages qui ont été entrepris à Saint-Pierrevillers et Nouillon-Pont en DQ et EH, ainsi qu'un troisième, BZ, à Amel. Ils ont été certainement arrêtés dans les calcaires ferrugineux et

Digitized by Google

n'ont pas atteint le niveau de la couche grise. Il ne faut donc pas en faire état, et nous ne les citons ici que pour déclarer qu'on doit les considérer comme nuls et non avenus (*).

En définitive, les points où il serait intéressant aujourd'hui d'entreprendre de nouvelles recherches pour déterminer l'extension du bassin, si elle existe vers le Nord-Ouest, sont ceux qui se trouvent de part et d'autre de la ligne qui joint Xivry-Circourt à Pierrepont. La vallée de la Pienne s'allonge suivant cette direction, et son confluent avec celle de la Crusnes en amont de Pierrepont semble faire ressortir l'existence d'un groupe de fractures important.

On connaît, à Boismont, un amas de tuf calcaire très considérable qui décèle l'existence d'une ancienne source incrustante, dont l'abouchement sur la vallée de la Crusnes correspond sans doute à l'ouverture d'une faille. Il n'y aurait rien d'impossible à ce qu'une formation de minerai plus ou moins riche existât dans cette région, insuffisamment explorée. Une couche jaune de qualité passable, rencontrée aux sondages de Bazailles et de Ville-au-Montois, viendrait à l'appui de cette supposition. Cette couche jaune a :

Au sondage FG : $0^m,87$ de puissance et :

Fer : 37 ; Chaux : 4 ; Silice : 21.

Et au sondage FB : $2^m,40$ de puissance avec :

Fer : 30 ; Chaux : 4 ; Silice : 30.

Il est enfin intéressant de remarquer que les courbes de niveau, de 200 à 100 et, à un degré moindre, celles

(*) Un sondage nouveau (FQ) a été exécuté récemment à l'Ouest de Mercy-le-Haut et à l'Est du sondage EU. Ses résultats ne diffèrent guère de ceux qui ont été trouvés à ce dernier. Mais il a donné au point de vue topographique des renseignements d'un haut intérêt.

Digitized by Google

de 100 à 0, dans leur tendance à s'infléchir vers l'Ouest, à l'extrémité de la région explorée, ébauchent un synclinal très aplati (que nous proposons de désigner par le nom de Xivry-Circourt), dans lequel on aurait des chances de rencontrer un enrichissement.

Faille de Joppécourt. — Il semble qu'on puisse déjà, sans trop s'aventurer, tracer la faille nourricière qui aurait donné naissance au bassin de Xivry-Circourt. Entre les sondages FQ et EU, il passe certainement une faille, car le mur de la couche grise est à la cote 185 dans le premier et à 132 dans le second, et il est tout à fait impossible, en conservant la continuité des courbes, de raccorder ces deux résultats sans admettre une faille entre les deux. D'autre part, entre Joppécourt et Mercy-le-Bas, existe une perte d'eau très importante, qu'on appelle « le Grand-Bichet » et qui jalonne très probablement un second passage de l'accident. C'est en nous guidant sur ces deux observations que nous avons tracé sur la Pl. V la faille de Joppécourt. Elle viendrait se terminer, du côté du Nord, à la cassure deBoismont et, du côté du Sud, à la faille de Mercy-le-Haut. Sa présence expliquerait le relèvement du plateau sur lequel se trouve cette localité, dont le nom est caractéristique.

§ 5. — Répartition du fer, du calcaire et de la silice dans les minerais du bassin de Landres.

Partage du gisement en trois zones. — Si l'on compare les compositions de la couche grise aux sondages CH, DB et EB, on constate des différences considérables entre elles ; de CH à DB, la distance n'est pourtant, à vol d'oiseau, que de 3 kilomètres. Elle est de 4 kilomètres entre DB et EB.

Digitized by Google

COMPOSITION DE LA COUCHE GRISE.

SONDAGES	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
CH	6,25	41	12	6
DB	8,73	32	18	6
EB	2,15	26	6	42

Ces sondages correspondent à trois zones distinctes, dans lesquelles les minerais sont respectivement :

1° Très riches et moyennement calcaires ;

2° Moyennement riches et très calcaires ;

3° Pauvres et siliceux.

En examinant un par un les résultats de toutes les recherches du bassin de Landres, nous avons été amené à les délimiter comme l'indique la Pl. VI.

La première zone comprend les régions marquées (1) et (2);

La deuxième zone, les régions (3) et (4) ;

La troisième zone est désignée par le chiffre (5).

Région (1) de la première zone. — Les minerais de cette zone ont une texture très fine, dans laquelle on ne distingue plus les oolithes. Leur couleur est rouge brique ou sang de bœuf. Dans le sondage DH, on a même trouvé un banc dont la couleur est noir bleuâtre. Nous reviendrons plus loin sur cette particularité.

Région (2) de la première zone. — Les minerais de cette région sont oolithiques, et leur couleur est grisâtre comme à l'ordinaire.

Le tableau suivant résume la composition de la couche dans l'ensemble de la première zone. On peut dire qu'elle est caractérisée par le produit moyen : fer, 41 ; chaux, 10 ; silice, 6.

Digitized by Google

	SONDAGES	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
Région (1)	CH	6m,25	41	12	6
	CF.....	5 80	41	12	6
	DH.....	6 85	40	13	6
	CB	6 42	41	9	7
Région (2)	CR	6 92	42	9	6
	DG	6 65	40	11	6
	CP.....	8 63	40	11	5
	CE.....	5 68	42	9	5
	BW.....	7 21	41	9	6
	CO.....	4 75	42	6	6
	CI.....	6 40	42	9	6

On trouvera aux *Annexes* (*Pièce* A_2) la coupe complète de la formation ferrugineuse du sondage CB.

Ci-après, nous reproduisons celle du sondage DH de Joudreville, située dans la région (1). C'est la carotte 46 de ce sondage, qui offre la couleur noir bleuâtre si spéciale que nous avons mentionnée plus haut.

Digitized by Google

COUCHE GRISE DU SONDAGE DH. — ÉPAISSEUR TOTALE : 6m,85.

DÉSIGNATION des carottes	HAUTEUR des carottes battues	HAUTEUR des carottes retirées	ANALYSE (Minerai sec) Perte au feu	Silice	Alumine	Peroxyde de fer	Protoxyde de fer	Acide phosphorique	Protoxyde de Mn	Chaux	Magnésie	Acide sulfurique	Total	Fer	Phosphore	Soufre	Manganèse
34	0m,35	0m,15	21,37	7,43	5,61	41,12	5,14	1,44	0,34	16,56	1,39	0,28	100,68	32,80	0,62	0,11	0,34
35	0 40	0 29	28,94	6,84	2,37	51,30	9,24	1,75	0,30	8,33	1,05	0,29	100,41	43,12	0,76	0,13	0,25
36	0 30	0 20	25,55	3,95	3,32	33,77	9,54	2,02	0,40	20,66	0,99	0,27	100,47	31,08	0,88	0,11	0,31
37	0 20	0 25	30,09	6,84	4,12	12,81	13,81	1,99	0,51	27,88	1,76	0,21	100,02	19,73	0,86	0,08	0,39
38	0 10	0 17	36,98	1,48	0,67	8,75	9,49	0,98	0,83	39,96	0,92	traces	100,06	13,52	0,42	traces	0,64
39	0 60	0 31	21,22	4,09	4,00	40,98	8,30	1,96	0,56	17,42	1,23	0,13	99,89	35,16	0,85	0.05	0,44
40	0 30	0 37	12,83	6,12	5,08	53,83	10,22	2,46	0,60	7,16	0,92	0,67	99,89	45,64	1,07	0,27	0,47
41	0 30	0 00	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
42	0 25	0 22	13,11	7,13	5,69	53,54	11,76	1,78	0,30	5,34	1,29	0,16	100,10	46,65	0,77	0,06	0,22
43	0 30	0 30	20,76	6,06	5,30	32,57	23,88	1,54	0,79	7,79	1,54	0,07	100,30	41,40	0,67	0,03	0,61
44	0 60	0 60	13,84	4,70	4,77	37,16	17,27	1,57	0,45	13,77	1,15	0,13	99,81	39,46	0,68	0,05	0,34
45	0 25	0 20	12,20	3,57	3,39	44,28	21,67	2,73	0,43	11,15	0,89	traces	100.31	47,88	1,19	traces	0,33
46	0 60	0 62	10,81	4,78	4,62	48,49	19,92	1,75	0,37	8,30	1,11	0,12	100,27	49,46	0,76	0,05	0,28
47	0 65	0 45	17,11	5,72	6,09	38,71	16,75	1,98	0,26	12,05	1,17	0,28	100,12	40,15	0,86	0,11	0,20
48	0 60	0 65	17,98	6,40	4,41	41,28	15,47	1,95	0,33	10,67	1,33	0,03	99,85	40,95	0,85	0,01	0,25
49	0 60	0 60	16,70	6,40	4,63	41,73	17,27	1,96	0,27	9,23	1,45	0.33	99,97	42,66	0,85	0,13	0,20
50	0 60	0 63	19,86	6,12	5,81	34,79	16,75	1,73	0,49	13,17	1,25	0,35	100,32	37,40	0,75	0,14	0,38
Composition moyenne :			18,37	5,68	4,61	39,77	15,31	1,85	0,42	12,67	1,22	0,21	100,03	39,78	0,80	0,08	0,32

Digitized by Google

COUCHE GRISE DU SONDAGE CE. — ÉPAISSEUR TOTALE : $5^m,68$.

DÉSIGNATION des carottes	HAUTEUR des carottes		ANALYSES (Minerai sec)														
	battues	retirées	Perte au feu	Silice	Alumine	Acide phosphorique	Peroxyde de fer	Protoxyde de fer	Protoxyde de Mn	Chaux	Magnésie	Acide sulfurique	Total	Fer	Phosphore	Soufre	Manganèse
31	$0^m,70$	$0^m,70$	14,81	5,27	7,69	2,16	53,79	9,63	0,40	5,18	1,33	traces	100,26	45,15	0,95	0,15	0,30
32	0 ,75	0 ,75	17,10	5,11	5,93	2,30	50,70	8,84	0,36	9,56	1,28	—	101.18	42,39	1 »	0,18	0,28
33	0 ,70	0 ,70	17,78	5,20	5,78	2,23	47,51	10,84	0,49	10 »	0,92	—	100,76	41,71	0,97	0,21	0,38
34	0 ,80	0 ,78	16,13	5,37	5,95	2,18	51,85	9,28	0,35	8,49	0,72	—	100,32	43,53	0,95	0,18	0,28
35	0 ,75	0, 77	15,71	5,54	5,77	1,99	52,43	11,11	0,48	6,24	1,25	—	100,52	45,36	0,86	0,17	0,37
36	0 ,70	0 ,49	21,08	5,27	5,79	1,56	36,73	14,84	0,55	13,65	1,14	—	99,61	37,26	0,68	0,28	0,42
37	0 ,55	0 ,76	19,24	5,26	5,41	1,85	41,64	11,80	0,36	12,44	1,15	—	99,15	38,34	0,81	0,24	0,28
38	0 ,70	0 ,68	18,22	6,05	5,91	2,05	34,69	20,30	0,37	9,70	1,65	—	98,94	40,09	0,89	0,30	0,28
			Composition moyenne :														
			17,34	**5,38**	**5,94**	**2,04**	**46,71**	**11,86**	**0,41**	**9,23**	**1,17**	traces	**100,08**	**41,94**	**0,89**	»	**0,315**

Digitized by Google

Dans la coupe suivante, prise dans la région (2), au sondage CE de Pienne, la constance de la teneur en silice des différents échantillons est remarquable.

Deuxième zone. — La deuxième zone, qui comprend les régions (3) et (4), est celle des minerais très calcaires ; les rognons de calcaires ferrugineux incorporés dans la couche n'ont pas de délimitation bien nette ; ils passent insensiblement au minerai riche ; leur triage constitue par cela même une opération très délicate.

La région (3) est caractérisée spécialement par une accumulation insolite du calcaire, qui se traduit par un surépaississement de la couche dont la puissance excède 8 mètres.

Dans la région (4), l'épaisseur de la couche diminue ainsi que la teneur en fer ; en outre, la concentration du calcaire en rognons tend à devenir moins nette : la chaux est disséminée dans la masse du minerai d'une façon plus uniforme.

Le tableau ci-après donne la composition de la couche grise dans ces deux régions, qui correspondent au produit moyen suivant : fer, 34 ; chaux, 17 ; silice, 8.

	SONDAGES	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
Région (3)	EL	8m,13	33	17	8
	CN	8 64	36	18	8
	DP	9 20	36	14	7
	DB	8 73	32	18	6
Région (4)	CV	3 78	28	20	8
	DK	2 34	32	17	9
	CX	5 91	31	20	7
	CQ	6 25	34	15	8

Dans la coupe détaillée du sondage EL, que nous reproduisons ci-contre, on a analysé séparément : 1° les

Digitized by Google

portions de la couche riche en mine proprement dite ; 2° les bancs de calcaire ferrugineux.

SONDAGE DE LANDRES (EL).

Coupe de la couche grise mélangée de rognons calcaires.

Epaisseur totale : 8m,13.

NUMÉROS des carottes	HAUTEUR battue	HAUTEUR retirée	ANALYSES Fer	Chaux	Silice	Perte au feu
Toit de la couche à l'altitude 154m,51						
54	0,40	0,30	0m,70 de mine :			
55	0,30	0,28	34,64	13,16	12,04	17,44
56	0,30	0,20	1m,04 de mine riche :			
57	0,20	0,25	39,53	9,52	8,25	18,35
58	0,35	0,18	et 0m,85 de calcaire :			
59	0,30	0,28	23,13	27,86	6,37	28,10
60	0,30	0,34				
61	0,33	0,33				
62	0,30	0,27	1m,27 de mine riche :			
63	0,37	0,37	39,40	10,54	8,66	17,56
64	0,31	0,31	et 0m,99 de calcaire :			
65	0,37	0,37	28,29	22,70	6,06	25,06
66	0,37	0,37				
67	0,43	0,43				
68	0,36	0,36	1m,35 de mine riche :			
69	0,35	0,33	39,04	10,84	8,06	18,28
70	0,37	0,39	et 0m,86 de calcaire :			
71	0,39	0,39	23,13	27,86	6,83	27,88
72	0,35	0,32				
73	0,35	0,39				
74	0,37	0,37	0m,66 de mine riche :			
75	0,34	0,34	35,56	10,46	11,80	18,32
76	0,37	0,37	et 0m,41 de calcaire :			
77	0,32	0,32	17,32	34,41	5,60	32 »
Composition moyenne :			32,78	17 »	8,15	21,66

Nous donnons, en outre, la coupe du sondage DB, qui montre la possibilité d'obtenir un produit à 36 p. 100 de

Digitized by Google

COUCHE GRISE DU SONDAGE DB

Epaisseur totale : 8m,73 dont la moitié supérieure (4m,50 environ) sera la plus avantageuse à exploiter.

DÉSIGNATION des carottes	HAUTEUR des carottes battues	HAUTEUR des carottes retirées	ANALYSE (à l'état sec) Perte au feu	Silice	Alumine	Acide phosphorique	Peroxyde de fer	Protoxyde de fer	Protoxyde de Mn	Chaux	Magnésie	Acide sulfurique	Total	Fer	Phosphore	Soufre	Manganèse
84	0m,75	0m,73	21,58	5,14	4,25	1,77	43,85	5,01	0,40	17,68	0,84	traces	100,52	34,61	0,77	0,30	»
85	0 45	0 47	20,27	3,86	4,81	1,96	44,22	9,72	0,35	12,27	1,62	0,06	99,13	38,53	0,86	0,27	0,025
86	0 40	0 37	19,26	5,85	4,65	1,84	43,87	12,19	0,41	10.15	1,58	0,06	99,86	40,21	0,80	0,31	0,024
87	0 70	0 67	18,22	3,92	6,52	1,78	47,51	12,03	0,45	8,38	1,97	0,025	101,205	42,63	0,78	0,35	0,01
88	0 70	0 72	18,42	5,09	5,39	1,92	48,43	10,26	0,35	9,11	1,87	0,21	101,05	41,90	0,84	0,27	0,08
89	0 70	0 62	19.38	5,20	5,42	1,73	44,89	9.80	0,41	11,77	1,77	0,36	100,73	39,06	0,76	0,31	0,14
90	0 70	0 68	22,58	6,34	4,09	1,58	39,21	7,79	0,26	17,84	1,58	0,35	101,62	33,52	0,69	0,14	0,20
91	0 65	0 67	23,59	6,42	3,29	1,51	36,92	7,71	0,26	18,81	1,82	0,42	100,75	31,86	0,65	0,17	0,20
92	0 60	0 56	24,87	6,96	3,30	1,54	34,64	6,48	0,32	21,12	1,39	0,39	101,01	29,30	0,67	0,16	0,24
93	0 70	0 74	29,51	5,53	2,67	1,20	22,10	8,71	0,37	28,94	0,97	0,23	100,23	22,26	0,52	0,091	0,28
94	0 70	0 70	28,80	7,22	3,42	1,18	19,19	7,71	0,48	30,22	1,32	0,33	99,87	19,44	0,52	0,13	0,37
95	0 70	0 72	22,01	6,83	5,65	1,77	33,07	11,80	0,32	16,15	1,74	0,13	99,47	32,34	0,77	0,052	0,25
96	0 65	0 66	26,05	5,70	3,36	1,49	27,50	9,61	0,22	24,07	1,46	0,14	99.60	26,76	0,65	0,058	0,17
97	0 70	0 69	25,64	9,06	3,52	1,40	20,73	11,42	0,37	22,75	1,80	0,32	97,01	23,40	0,61	0,13	0,29
98	0 70	0 70	23,32	12,14	4,42	1,87	17,30	14,66	0,32	20,88	1,39	0,20	97,00	23,52	0,82	0,08	0,24
			Composition moyenne :														
			23,15	6,12	4,29	1,59	34,81	9,53	0,34	18,32	1,57	0,22	99,04	31,80	0,[illegible]	0,[illegible]	0,27

fer en n'exploitant la couche que sur la hauteur des huit premières carottes, c'est-à-dire sur $4^m,50$ environ, et en abandonnant dans la mine les bancs inférieurs, excessivement calcaires (*).

Pour caractériser la région (4), nous reproduisons la coupe du sondage CX. Elle se rapporte à la couche entière, d'une hauteur de $5^m,91$. En pratique, les bancs inférieurs, caractérisés par les carottes 57 à 60, seront à dédaigner, et on n'exploitera pas plus de $4^m,50$, comme dans les cas précédents (**).

(*) On a cherché à définir la richesse d'un sondage par le produit d'une multiplication dont l'épaisseur de la couche et sa teneur moyenne en fer seraient les facteurs; on conçoit que ce produit peut varier beaucoup d'un sondage à l'autre si la coupe de la formation ferrugineuse est faite inégalement. C'est ainsi que le sondage DB aurait pu se trouver défini par une couche de $4^m,50$ seulement au lieu de $8^m,73$.

(**) L'observation déjà faite précédemment au sujet du sondage DB s'applique également à CX, qui aurait pu tout aussi bien être défini par une couche grise de $4^m,50$ que par $5^m,91$.

La définition de la richesse d'un sondage par le produit obtenu comme il est dit plus haut n'est donc admissible que pour les régions (1) et (2), dans lesquelles la couche est, sans conteste, exploitable sur toute sa hauteur.

Digitized by Google

SONDAGE DE LANDRES (CX), COUPE DE LA COUCHE GRISE

Epaisseur totale : 5m,91.

DÉSIGNATION des carottes	HAUTEUR DES CAROTTES		ANALYSES			
	battues	retirées	Fer métallique	Chaux	Silice	Alumine
44	0m,50	0m,29	34,36	14,44	7,74	7,17
45	0 44	0 44	35,19	13,27	6,85	8,30
46	0 33	0 33	33,65	15,18	5,95	6,67
47	0 50	0 48	35,83	12,77	5,90	7,48
48	0 50	0 56	36,98	10,35	6,66	8,85
49	0 48	débris	35,73	11,83	6,45	7,85
50	0 28	0 28	30,60	18,49	5,78	7,04
51	0 22	0 22	21,91	24,36	5,60	7,02
52	0 50	0 26	39,97	7,74	7,58	9,56
53	0 30	0 30	26,85	22,38	5,36	6,68
54	0 20	0 20	35,14	13,00	7,14	8,45
55	0 25	0 25	32,37	18,39	6,15	5,61
56	0 30	0 22	30,79	18,82	6,71	6,84
57	0 40	0 08	18,36	33,32	3,76	3,37
58	0 30	0 20	20,73	29,97	4,24	5,34
59	0 30	0 30	26,75	21,20	8,16	4,70
60	0 30	débris	24,87	25,63	6,15	4,61

La troisième zone ne comprend plus qu'une autre couche, pauvre et très siliceuse.

Nous avons donné plus haut (p. 175 et 180) la composition moyenne des sondages EB, EN, CU, EF, EO, ET, EP, EE, EU, ED. Pour préciser davantage, nous reproduisons ici la coupe détaillée du sondage EP.

Digitized by Google

COUCHE GRISE DU SONDAGE DE PREUTIN (EP).
Epaisseur : 5m,29.

NUMÉROS des carottes	HAUTEUR DES CAROTTES		ANALYSE			
	battues	retirées	Fer	Chaux	Silice	Alumine
81	0m,10	0m,25	21,00	23,50	18,68	4,07
82	0 20	0 20	20,14	21,90	17,15	4,04
83	0 16	0 16	18,04	20,80	22,42	5,68
84	0 22	0 22	22,10	16,01	24,85	6,25
85	0 32	0 32	23,57	20,10	20,80	4,48
86	0 40	0 40	21,14	20,60	21,05	5,05
87	0 22	0 22	23,41	15,54	23,65	6,20
88	0 32	0 32	21,54	17,32	23,78	6,32
89	0 52	0 52	20,48	10,47	34,39	7,99
90	0 32	0 32	19,27	10,13	39,23	7,15
91	0 60	0 60	18,00	11,18	44,16	5,39
92	0 42	0 42	16,38	19,44	34,00	1,77
93	0 53	0 53	19,80	13,77	36,23	4,81
94	0 47	0 47	17,92	13,26	41,41	3,93
95	0 37	0 47				
	0 10 marne					

La teneur élevée en silice de ces produits et leur faible richesse en fer les rendent absolument inutilisables.

§ 6. — Réactions chimiques servant a expliquer la formation des deux zones exploitables.

L'existence des trois zones si différentes qui viennent d'être décrites montre, selon nous, que le carbonate de

Digitized by Google

chaux qui accompagne les composés du fer, dans le bassin de Landres, a la même origine que ceux-ci. L'élément quartzeux, si abondant dans la troisième zone, est, au contraire, dû à l'apport des agents de sédimentation.

Les minerais du sondage CE (p. 187), où la silice n'apparaît que dans la proportion de 5 à 6 p. 100, contiennent certainement une grande partie de cet élément à l'état combiné avec le fer et l'alumine. Le silicate de fer, en particulier (chlorite), est reconnaissable à la couleur verte qu'il donne à la pâte, dans laquelle les oolithes d'hydroxyde sont enchâssées. Il se peut, en outre, qu'il y ait aussi de la silice libre.

Zone des minerais calcaires. — L'accumulation du carbonate de chaux dans la deuxième zone (régions 3 et 4) peut s'expliquer comme suit :

Parvenues dans les eaux sous-marines par une émergence telle que α située sur la faille nourricière de Bonvillers (Pl. VI), les matières amenées de la profondeur à l'état de dissolution, grâce à la haute thermalité des sources et à la grande tension de l'acide carbonique, subissaient des sorts différents, suivant la stabilité de leur combinaison : 1° les silicates et les phosphates subsistaient dans leur état primitif et se laissaient entraîner, soit par la gravité, soit par les courants, sans subir de modifications ; 2° le carbonate de chaux subsistait partiellement tant qu'il restait assez d'acide carbonique pour le maintenir dissous à l'état de bicarbonate ; 3° le carbonate de fer, très instable, au contraire, se décomposait rapidement pour engendrer un peroxyde qui se précipitait. Des eaux riches en carbonate de fer pouvaient néanmoins, en raison de l'afflux incessant de cet élément (*), subsister jusqu'à une certaine

(*) Les agents d'oxydation pouvaient devenir à certains moments insuffisants et se trouver impuissants à transformer le fer au minimum en peroxyde.

Digitized by Google

distance de l'émergence et le charrier sur un grand trajet.

Zone des minerais purs. — La région 1, qui est, comme nous l'avons dit, celle des minerais rougeâtres, constituait, pour l'émission située au point α, le laboratoire principal où s'effectuait la décomposition du carbonate de fer. Cette région est allongée suivant la pente depuis le sondage CH jusqu'au sondage CB. D'une part, l'agitation de l'eau et la rapidité avec laquelle se précipitait l'oxyde de fer ne permettaient pas la formation de grosses oolithes ; d'autre part, la chaleur ambiante communiquait aux dépôts la couleur rougeâtre qui les caractérise.

La chaleur du milieu n'était pas produite seulement par la dispersion dans la mer des produits liquides ou gazeux, à température élevée, que débitaient les sources, mais aussi par voie de réaction chimique.

Phénomènes calorifiques attribuables à la décomposition du carbonate de fer. — On sait que la transformation du carbonate de fer en peroxyde est accompagnée d'un dégagement de chaleur qui atteint, d'après les données de la thermochimie, 65 calories par kilogramme de carbonate. Cette quantité de chaleur est presque suffisante pour élever le carbonate de fer à la température de 400°, qui est celle de sa dissociation.

Cette propriété est mise à profit à Bilbao, comme on sait, pour calciner à très peu de frais le carbonate de fer de ce gisement. Le minerai de carbonate, transformé en oxyde par le grillage, a une texture homogène et un aspect noir bleuâtre, qui se retrouve dans le banc déjà signalé du sondage DH. En se reportant à la coupe de ce sondage donnée p. 186, le lecteur remarquera la teneur élevée en fer, 49,46 p. 100, et la faible perte au feu, 10,81 p. 100, de la carotte 46. Cet échantillon est celui qui offre d'une

Digitized by Google

façon si frappante l'analogie qui vient d'être signalée avec le carbonate grillé de Bilbao.

Pour les couches de Lorraine, la teneur de 49 p. 100 est tout à fait une exception. Elle dénote qu'il s'est fait, dans les régions du sondage, une concentration anormale du produit ferrugineux, et, par suite, un dégagement de chaleur insolite.

Dans la carotte 46 du sondage DH, la partie la plus fonçée est véritablement analogue au carbonate grillé de Bilbao, car elle renferme 60,89 p. 100 de fer. C'est la teneur la plus élevée qu'on ait jamais trouvée dans le gisement lorrain. L'analyse est absolument certaine, ayant été contrôlée par trois laboratoires différents (*).

La couleur rouge et la couleur noir bleuâtre des minerais dont nous venons de parler n'ont rien de commun avec celle que prennent les minerais ayant subi l'action prolongée des eaux. Ces derniers sont ocreux; ils tachent les doigts en jaune très facilement.

Dans la région avoisinant le sondage DP, on a reconnu récemment, en faisant un sondage de reconnaissance pour préparer le fonçage du puits de la concession de Landres, qu'un courant d'eau circulait dans la couche grise sous une pression élevée (18 atmosphères). Les effets de ce courant d'eau sont décelés, au sondage DP,

(*) Voici l'analyse complète de ce très curieux banc de minerai qui offre une densité tout à fait exceptionnelle :

Perte au feu	4,68	Contenant :		
Silice	3,70	Fer métallique	60,89	p. 100
Alumine	4,30	Phosphore	0,61	—
Chaux	2,10	Soufre	0,02	—
Magnésie	0,17			
Protoxyde de fer	28,59			
Peroxyde de fer	55,21			
Oxyde de manganèse	traces			
Acide sulfurique	0,06			
Acide phosphorique	1,40			
Total	100,21			

Digitized by Google

par l'aspect anormal des minerais de certaines parties de la couche. Notamment ceux de la carotte 35 ont une couleur ocreuse, très différente de la teinte grise des autres bancs, et en tous points analogue à celle des minerais d'affleurement.

§ 7. — Action des courants.

Ainsi, d'une part l'aspect spécial des minerais (texture et couleur), d'autre part la répartition du fer, du calcaire et de la silice, dans les trois zones que nous avons décrites, militent en faveur de la théorie des failles nourricières.

Il faudrait certainement, pour expliquer toutes les particularités du gisement, tenir compte du rôle qu'ont pu jouer les courants contemporains.

On ne peut faire, à cet égard, que des suppositions.

Une de celles qui paraissent les plus vraisemblables consiste à admettre l'existence d'un entraînement des produits rejetés par les sources, vers le Nord-Ouest, soit du point α de la faille de Bonvillers, vers Domprix.

La saillie que font les limites des zones 2 et 3 dans cette direction serait la conséquence de cet entraînement.

Dans les deux sondages CM et ET, on a trouvé des épaisseurs considérables de bancs minéralisés, sans zone exploitable bien nette.

Au sondage CM, le niveau de la couche grise est représenté par une hauteur de $13^m,48$, dont les différentes parties donnent à l'analyse des teneurs en fer, comprises entre 15 et 30 p. 100, en chaux 10 à 20, et en silice 20 à 40.

C'est la partie inférieure, sur $1^m,05$, qui présente surtout les caractères ordinaires extérieurs de la couche grise ;

Digitized by Google

de là vient que, sur la coupe IV et à l'*Annexe* A[5], le sondage est figuré avec une couche grise de 1[m],05 seulement.

Le sondage ET a été extrêmement curieux au point de vue de la dissémination de la minéralisation.

En voici la coupe résumée :

SONDAGE DE DOMPRIX (ET). — Morts-terrains : *188[m],50.*

FORMATION FERRUGINEUSE		COMPOSITIONS MOYENNES		
		Fer	Chaux	Silice
Calcaire ferrugineux	3[m],90			
Couche rouge marneuse	1 ,20	30	17	14
Calcaire coquillier	1 »			
Couche rouge	1 ,96	31	16	12
Calcaires marneux et marne	9 ,16			
Couche jaune (?) (très mélangée de stérile)	7 ,68	19	25	30
Marne grise	3 ,80			
Calcaire coquillier	0 ,20			
Couche grise (très mélangée de rognons)	7 ,16	28	5	32
Marne grise	0 ,69			
Couche brune	1 ,45	35	6	25
Marne grise	3 ,05			
Couche noire	1 ,20	38	3	21
Marne verdâtre ferrugineuse	3 ,15			
Couche verte compacte	0 ,99	35	8	11
TOTAL	46 ,59			

L'épaisseur considérable de la formation de ce sondage est due surtout aux sédiments pauvres qui se sont mêlés aux minerais. Dans les couches de 7[m],68 et de 7[m],16, où la silice figure en moyenne pour 30 et 32 p. 100, l'irrégularité de la composition est extrêmement grande.

Suivant que l'élément minerai ou le sédiment prennent la prépondérance, la teneur en fer dans la couche de 7[m],16 varie de 18 à 38 p. 100; la teneur en chaux, de 2 à 11, et celle de la silice, de 17 à 54. L'alumine est toujours en faible quantité, soit de 2 à 7 p. 100.

Il est à présumer que, sur toute la lisière de la zone 2 (région 4), la consistance des couches traduit d'une façon analogue la rencontre des sédiments quartzeux avec les flux de minerais provenant de la faille nourricière.

Digitized by Google

§ 8. — Contact, a Murville, du bassin de Landres avec le bassin de Tucquegnieux.

A la pointe Nord-Est du bassin de Landres, il existe un antagonisme du même genre non plus entre un flux ferrugineux et des sédiments pauvres, mais entre des flux ferrugineux de provenances diverses. A hauteur du sondage DC, la limite du bassin de Landres fait, en effet, un rentrant vers l'Ouest qui est dû au flux ferrugineux fourni par la faille nourricière d'Audun-le-Roman.

Les sondages CV et DK, qui sont tout à fait caractéristiques de la deuxième zone (région 4), sont en effet très différents du sondage DC.

Au sondage DK, la couche grise a 6^{m},03 de puissance, avec une partie centrale excessivement calcaire.

La partie supérieure, sur 2^{m},34, a la composition suivante :

Fer	32
Chaux	17
Silice	9

et la partie inférieure, sur 1^{m},50, la composition :

Fer	27
Chaux	19
Silice	11

Au sondage CV, les résultats sont à peu près similaires, savoir, couche grise de 6^{m},89, avec partie centrale extrêmement calcaire.

La partie supérieure, sur 3^{m},78, a la composition moyenne :

Fer	28
Chaux	20
Silice	8

Digitized by Google

et la partie inférieure, sur $1^m,56$, la composition :

Fer	20
Chaux	22
Silice	24

L'augmentation de la silice dans les produits de sondage CV tient à ce qu'il est tout près de la lisière de la région 4.

Le sondage DC, au contraire, a rencontré une couche grise d'excellente qualité, soit :

Epaisseur : $5^m,94$	Fer	39
	Chaux	10
	Silice	8

Ce sondage est dans la première zone du flux provenant de la faille d'Audun-le-Roman, tandis que les deux précédents sont dans la deuxième zône du flux de Bonvillers.

Pour compléter la description de la région, ajoutons enfin qu'au sondage DM, situé au Nord de la faille d'Audun-le-Roman, la couche grise est très pauvre et n'a que $1^m,92$ d'épaisseur.

Il est incontestable que les environs de Murville, où se trouvent les quatre sondages que nous venons de passer en revue, constituent une région de transition, ce qui n'est pas pour surprendre, si l'on attribue aux failles nourricières un rôle décisif dans la répartition des minerais, attendu qu'il y en a trois qui se terminent non loin de Murville, savoir : celle de Bonvillers, celle d'Audun-le-Roman et celle de Mercy-le-Haut.

Digitized by Google

§ 9. — Terminaison du bassin de Landres dans sa région méridionale.

Nous n'avons parlé, dans tout ce qui précède, que de la limite septentrionale du bassin de Landres, où l'élément siliceux se montre de plus en plus prépondérant. Il faut remarquer, à ce propos, que, depuis cette limite jusqu'aux affleurements de la couche grise dans le bassin de Longwy, cet élément ne cesse de jouer un grand rôle dans la composition des assises. Il est probable qu'il provient de la destruction des formations puissantes de grès qui existent dans le Luxembourg, dans le lias inférieur (sinémurien), qui devaient être émergées à cette époque.

Sur la lisière Sud du bassin de Landres (région de Gondrecourt), il n'en est plus de même.

Les sédiments sont surtout argileux et l'on a trouvé, au sondage AX, par exemple, dans les échantillons ferrugineux jugés digne de l'analyse, des teneurs en alumine variant de 10 à 20 p. 100.

La deuxième zone paraît insignifiante sur la bordure méridionale de la zone exploitable. Elle comprendrait :

1° Le sondage DA, où la couche grise n'a que $1^m,80$ d'épaisseur et 33 de fer, 14 de chaux et 6 de silice;

2° Le sondage EM, où elle a $3^m,91$, dont 1 banc supérieur de $1^m,35$ avec : fer, 26; chaux, 17; silice, 14; 1 banc intermédiaire très pauvre de $1^m,13$; et 1 banc inférieur de $1^m,43$ avec : fer, 22; chaux, 20; silice, 15;

3° Le sondage CZ, où la couche a $5^m,45$ avec des teneurs en fer variant de 16 à 25 et une teneur en chaux moyenne de 20 p. 100.

La faible importance de cette zone, comparée à celle de la région Nord du bassin, semble être l'indice d'un défaut de courant dans la direction du Sud-Ouest.

Digitized by Google

Avant de quitter le bassin de Landres, une dernière remarque.

Il est probable que des dépôts de minerais plus ou moins calcaires se sont effectués dans les différents bassins, suivant un processus analogue à celui qui vient d'être étudié en détail pour le bassin de Landres. Ce dernier se prêtait d'autant mieux à une étude de ce genre qu'il a été exploré avec beaucoup de soin et qu'il est en quelque sorte isolé des autres bassins. Le régime de la sédimentation y est aussi, en raison de son éloignement des bords de la mer toarcienne, plus régulier et plus uniforme que dans les autres bassins trop rapprochés du littoral. Dans ceux-ci, l'influence des courants venant des régions exondées, et charriant des sédiments de nature diverse, calcaires, argileux ou quartzeux, s'est fait davantage sentir et masque plus facilement le rôle des failles nourricières.

Il ne sera donc pas possible, dans ce qui va suivre, d'analyser la répartition des minerais en aussi grand détail. Le niveau de la couche grise, où les dépôts lenticulaires fournis par plusieurs émergences se sont confondus, est celui qui offre le plus de complications à cet égard. Ce n'est que dans les horizons inférieurs ou supérieurs (niveaux des couches noires ou rouges) que le rattachement des zones de richesse aux failles nourricières sera possible, parce que les émissions, beaucoup plus faibles, sont restées indépendantes et isolées. Nous aurons soin de faire ressortir ces rapprochements dans la description des deux bassins : 1° d'Ottange-Tucquegnieux ; 2° de l'Orne, à laquelle nous allons maintenant procéder.

Digitized by Google

CHAPITRE V.

BASSIN D'OTTANGE-TUCQUEGNIEUX.

PREMIÈRE SECTION.

Couche grise.

1. — Faille d'Ottange-Audun-le-Roman envisagée comme nourricière.

La faille d'Ottange-Audun-le-Roman est certainement a nourricière la plus importante qu'il y ait lieu de considérer dans ce bassin. Elle se distingue très nettement à la surface du sol, où l'on suit sa trace depuis Rumelange jusqu'à Murville.

Dans son trajet sur le territoire français, sa direction est sensiblement N. 63° E. Dans la partie luxembourgeoise et allemande, comprise entre Rumelange et Ludelange, elle est orientée N. 35° E. Entre Ludelange et la frontière française, elle s'incurve vers le Nord en laissant Boulange au Sud. Le rejet se fait constamment sur la lèvre orientale. Il est faible à Ottange, où les courbes de niveau de la couche n'indiquent qu'une dénivellation de 10 à 15 mètres. Il augmente jusqu'à Ludelange où il atteint 40 mètres. A hauteur de Boulange, il est de 30 mètres environ; dans la partie française, il se réduit à 25 ou 20 mètres. Auprès d'Audun-le-Roman, la faille met en regard le bajocien supérieur et le bathonien inférieur, celui-ci se trouvant sur la lèvre méridionale.

A Boulange et Ludelange, les cartes allemandes montrent les marnes de Gravelotte (du bathonien moyen), abaissées au niveau de l'oolithe de Jaumont (du bathonien

Digitized by Google

inférieur). Le tracé superficiel de la faille est, d'après cela, parfaitement connu; il est, en outre, confirmé par les résultats des sondages.

Sondage de Ludelange (YU). — Celui qui a été exécuté, en 1898, par MM. de Wendel, à Ludelange (YU), est certainement tombé dans la zone des brouillages de cette faille; car, à différentes reprises, l'eau et les produits broyés qui séjournent d'ordinaire dans le fond du trou de sonde ont disparu complètement.

Les résultats de ce sondage étant très intéressants, nous en reproduisons ci-après la coupe, que nous devons à l'obligeance de la maison de Wendel.

La puissance exceptionnelle de la formation (57^{m},65) est due à l'existence de la couche rouge sableuse qui occupe la partie supérieure de la formation et à la facilité avec laquelle les sédiments pouvaient se rassembler dans le fond du synclinal. C'est à ce phénomène qu'il faut attribuer les épaisseurs considérables données pour la couche grise dans les coupes jointes au mémoire de M. Kohlmann (*Sthal und Eisen*, 1898), dont quelques-unes sont reproduites à la Pl. VIII.

Malheureusement, ces coupes, qui ne sont accompagnées d'aucune analyse, ne permettent pas de se rendre compte de l'importance des bancs exploitables.

Ce qui paraît certain, c'est qu'on commettrait une grande erreur en se basant sur les épaisseurs figurées dans ces schémas pour en déduire les tonnages utiles.

Dans le sondage de Rochonvillers (YM) — Pl. VIII — par exemple (n° 16 de la carte de M. Kohlmann), la couche grise est figurée avec une puissance de 10^{m},08, qui est la plus grande de toutes celles qui aient été publiées jusqu'à ce jour; mais rien ne fait connaître dans quelle proportion le minerai pourrait en être utilisé.

Digitized by Google

SONDAGE DE LUDELANGE (YU).

Cote de l'orifice : 339,13.

DÉSIGNATION DES COUCHES	ALTITUDES du mur	ÉPAISSEURS	OBSERVATIONS ET ANALYSES
Toit de la formation.....	168,78		
Couche rouge sableuse...		7m,60	
Calcaire ferrugineux.....	149,58	11 ,60	
Terrain broyé		1 ,40	Sur une hauteur de 2m,50, on n'a pas eu besoin de curer le trou de sonde, les matières broyées étant entraînées dans les crevasses.
Minerai rougeâtre.....	145,88	2 ,30	
Marne.....		0 ,39	
Mine rouge.....		4 ,01	3 échantillons analysés: Fer. Chaux. Silice. I 23 20 19 II 46 5 7 III 29 25 4
Minerai grisâtre.....		1 ,75	
Terrain broyé.....		1 ,10	On n'obtient ni carottes, ni curage.
Mine jaune.....		3 ,80	3 échantillons analysés: Fer. Chaux. Silice. IV 26 14 24 V 24 12 30 VI 23 15 28
Marne et minerai.....		1 ,00	
Terrain broyé.....		2 ,65	Ni carottes, ni curage:
Couche grise.....	129,03	2 ,15	Analyse d'un échantillon. Fer. Chaux. Silice. VII 47 3 8
Calcaire et marne.....		7 ,35	
Couche brune.....		6 ,75	Analyses de divers échantillons: Fer. Chaux. Silice. VIII 38 4 22 IX 37 8 15 X 15 17 38
Marne		0 ,40	
Couche noire verdâtre..		3 ,40	XI 14 8 34 XII 33 9 11 XIII 35 6 11
Mur de la formation.....	111,13	Epaisseur totale.....	57m,65

Sondage de Tressange (YV). — A défaut de renseignements précis sur ce sondage (YM), nous pouvons citer celui de Tressange (YV), exécuté, en 1899, par la maison de Wendel. Situé dans la partie centrale du synclinal, il accuse une couche grise de 11m,65; mais, en réalité, il n'y a qu'un banc de 2m,50 véritablement riche; le reste est du calcaire ferrugineux.

Digitized by Google

SONDAGE DE TRESSANGE (YV).

Cote de l'orifice : 342,58.

CONSISTANCE DE LA COUCHE JAUNE ET DE LA COUCHE GRISE.

DÉSIGNATION DES COUCHES	ALTITUDES du mur	ÉPAISSEURS		OBSERVATIONS ET ANALYSES			
Toit de la couche jaune...	134,03						
Couche jaune.....	128,53	5m,50		Analyses sur échantillons:	Fer.	Chaux.	Silice.
				I	30	23	3
				Analyses de 8 échantillons:	Fer.	Chaux.	Silice.
			6m,75	II	19	16	29
				III	25	9	31
Couche grise.....	116,68	11m,65		IV	25	23	11
			1 ,20	V	15	37	5
				VI	45	5	9
			2 ,50	VII	47	3	8
				VIII	46	4	8
			1 ,20	IX	25	27	5

N. B. — La proportion des rognons calcaires mélangés à la mine dans la moitié inférieure de la couche atteint à peu près 50 p. 100.

§ 2. — Région occidentale du synclinal d'Ottange. District d'Aumetz.

Dans les sondages ZH, ZI, ZK, ZM, ZL de la région d'Aumetz, voisine de la frontière, la couche grise aurait de 7 à 8 mètres, d'après les coupes de M. Kohlmann (Pl. VIII). En réalité, la moitié seulement, soit 4 mètres environ ou 5 mètres au plus, peut être considérée comme exploitable pratiquement, avec une teneur moyenne de: fer, 35; chaux, 14; silice, 8.

Le sondage E de Crusnes, en France, séparé des précédents par la faille médiane, est moins bon (Pl. X).

Il n'a rencontré qu'une couche grise médiocre de 4m,39 avec : fer, 28 ; chaux, 22; silice, 7.

Résultats analogues au sondage L d'Errouville, 3m,42 avec 30 de fer, 19 de chaux, 5 de silice.

Digitized by Google

Plus au Sud encore, à Serrouville, où la faille de Crusnes et la faille médiane se rejoignent, la couche grise disparaît. Le sondage de Serrouville (N) (qui a été vérifié par un autre placé dans son voisinage immédiat) a donné des résultats complètement insignifiants en couche grise (on n'y a rencontré qu'une couche noire de $0^m,80$) (Pl. X).

Aux sondages O et BU de Beuvillers la couche, exploitable a de 3 à 4 mètres. Très calcaire, puisqu'elle contient près de 20 p. 100 de chaux, on n'est pas bien fixé sur sa teneur moyenne en fer. C'est la partie inférieure qui est la plus riche. On y trouve des teneurs de 38 à 39 p. 100 au milieu d'autres à 23 et 25 p. 100.

Ces résultats concordent avec ceux du sondage d'Audun-le-Roman (ER) (Pl. X), exécuté en 1899, où l'on a trouvé une couche grise de $3^m,48$, avec : fer, 32; chaux, 17; silice, 10.

Disons de suite qu'aux sondages de Malavillers (DN), Mercy-le-Haut (DL), Murville (DM) (Pl. X), la couche grise, pauvrement représentée, est inexploitable. Ils se trouvent dans la région de l'anticlinal Serrouville-Preutin.

§ 3. — Région orientale du synclinal.

Si nous passons maintenant sur le bord oriental du synclinal, entre Ottange et Entrange, par exemple, nous trouvons encore un appauvrissement, dû cette fois à ce qu'il n'y a plus, de ce côté, de failles nourricières, ainsi que nous l'avons déjà fait observer en parlant précédemment de la coupe n° 1 de M. Kohlmann. C'est le cas représenté théoriquement par la *fig.* 3, au chapitre II (Voir, Pl. VIII, les coupes des cinq sondages YE, YL, YN, YI, YK, que nous reproduisons d'après M. Kohlmann).

Digitized by Google

§ 4. — Région du Luxembourg.

La même observation s'applique aux mines du Luxembourg. Inexploitables sur le versant Est de la vallée de Dudelange, elles deviennent meilleures sur le versant occidental, au fur et à mesure qu'on se rapproche de la vallée de Rumelange. La faille de Dudelange, dont le rejet très faible est marqué sur la coupe XII (Pl. IX), ne paraît avoir joué qu'un rôle très accessoire, dans la genese des minerais. Les deux coupes ci-après, relevées en LA (Langenberg) et LC (Weich), donnent, en effet, pour la couche grise, des résultats très semblables de chaque côté de la faille :

	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
	1° En amont de la faille.			
Au Langenberg.....	3m,40	33,70	13,55	9,38
A Weich.....	3 00	32,38	15,08	8,64
	2° En aval de la faille.			
Au Langenberg.....	3m,30	31,60	13,52	10,80
A Weich.....	3 30	34,08	12,15	10,32

La proportion relativement élevée de la chaux dans ces analyses s'observe constamment dans la couche grise du Luxembourg.

Au Steinberg et au Kirchberg (LE et LF), on a 3m,50 à 4 mètres de couche avec 33 de fer, 12 de chaux, 6 de silice.

A Vir Mohr et au Schlossbuch (points LG et LH), la chaux monte à 20 et 24 p. 100, le fer restant en dessous de 30 ; puis, en aval et à l'ouest de la faille Mittelsprung, on retrouve un enrichissement accompagné d'une diminution de la chaux, que la coupe du point LI fait

Digitized by Google

ressortir. On y trouve, en effet, une couche de 3m,90 avec la composition suivante :

Fer, 38,22; Chaux, 6,62; Silice, 15,52.

D'après cela, il est vraisemblable que la faille médiane est nourricière.

Son rejet est ici très important, soit une quarantaine de mètres vers l'Ouest. Au contraire, entre Crusnes et Aumetz, il diminue sensiblement et reste en dessous de 10 mètres.

En se rapprochant de la faille d'Esch, le calcaire reprend l'avantage, en même temps que la teneur en fer redescend aux environs de 30.

COMPOSITION DE LA COUCHE GRISE D'ESCH ET D'AUDUN-LE-TICHE.

	FER	CHAUX	SILICE	
1° A Esch.....	30,84	18,05	9,10	D'après M. Dondelinger.
2° A Audun-le-Tiche ; partie supre sur 2m,60.	35,85	14,40	5,87	D'après M. Ch. Palgen.
Partie infre sur 3m,40.	24 »	26,40	5,47	

Il est fort difficile, d'après ces renseignements, d'un caractère trop vague, d'indiquer les points d'émergence des minerais de la couche grise.

De ce que la région du Luxembourg, au Nord, et celle de Beuvillers, au Sud, sont très calcaires, on semble cependant en droit de conclure qu'elles appartiennent à la deuxième zone, telle que nous l'avons définie en décrivant le bassin de Landres.

La première zone serait située entre les deux, de part et d'autre d'Aumetz.

Les sondages ZH, ZI, ZK, ZL, ZP, où l'on voit la couche grise figurer avec une puissance moyenne de 8 mètres, seraient situés dans cette zone, qui dépendrait

Digitized by Google

d'une émission située selon toutes probabilités sur la faille médiane, entre Crusnes et Aumetz.

Les épaisseurs exceptionnelles de 10 à 12 mètres qui ont été observées à proximité de la faille d'Ottange tiendraient à la superposition de la deuxième zone de l'émission d'Aumetz et d'une ou plusieurs autres émissions (première zone ou deuxième zone, suivant les points) dépendant de cette faille.

Le sondage YM de Rochonvillers, où l'on a trouvé une couche de 10 mètres, caractériserait la deuxième zone d'une émission de cette dernière catégorie, dont la troisième zone serait décelée par les sondages YI et YN, qui contrastent tant avec YM (Voir les coupes de la Pl. VIII).

Pousser plus loin cette analyse serait téméraire dans l'état actuel des connaissances que l'on possède sur la consistance des couches. L'essai de systématisation qui précède indique simplement quel parti on peut tirer, au point de vue pratique, de la théorie des failles nourricières pour classer les régions en première, deuxième ou troisième zone. Il va de soi que, selon qu'une mine sera établie sur l'une ou l'autre des zones, sa valeur pourra différer du tout au tout.

§ 5. — Région septentrionale du synclinal de Tucquegnieux (Audun-le-Roman, Anderny).

Entre la frontière et Murville, la faille d'Audun-le-Roman sépare deux séries de sondages bien différents :

Au Nord, ceux de Mercy-le-Haut (DL), de Murville (DM), de Malavillers (DN), ne contiennent qu'une couche grise sans aucune valeur ;

Au Sud, les sondages de Murville (DC), de Bonvillers (DF), d'Anderny (DE), de Malavillers (BG), d'Audun (BK),

Digitized by Google

de Bazonville (BJ) (Voir, Pl. X, la différence de composition des sondages DM et DC, ER et BK), sont, au contraire, très bons, comme le montre le tableau ci-dessous :

COUCHE GRISE.

NOMS DES SONDAGES	ÉPAISSEURS	COTES du mur	TENEURS EN			
			fer	chaux	silice	alumine
Murville (DC)	4m,21	146	38	10	7	8
Bonvillers (DF)	4 ,35	101	38	12	7	7
Anderny (DE)	3 ,87	119	38	10	8	9
Malavillers (BG)	2 ,45	145	36	14	8	6
Audun (BK)	2 »	153	41	9	7	9
Bazonville (BJ)	2 ,70	118	39	12	10	5

Nota. — Dans le dernier sondage, BJ, au-dessous de la couche riche de 2m,70, il existe un banc de 1m,80 où les échantillons ont été très mal réussis, et qui consiste en une alternance de minerai et de calcaire ferrugineux, probablement exploitable. Cela porterait la puissance totale de la couche grise à 4m,50, résultat parfaitement concordant avec ceux des sondages ZX et ZY (Pl. VIII), situés de l'autre côté de la frontière, où l'on a trouvé 4m,80 et 4m,71.

Les résultats consignés au tableau qui précède s'accordent avec l'hypothèse d'émergences situées, d'une part, sur la faille d'Audun, à hauteur de cette localité, et, d'autre part, sur la faille de Bonvillers.

§ 6. — Région occidentale. — Mairy-Tucquegnieux.

C'est de cette dernière faille, et peut-être aussi de celle de Norroy, que proviendrait le minerai de la région de Mairy. Quant au thalweg du synclinal, qui s'allonge du Sud-Ouest au Nord-Est, en passant par Tucquegnieux, et un peu au Nord de Trieux, il devait recevoir non seule-

Digitized by Google

ment les apports des failles de Bonvillers et d'Audun, mais aussi ceux des failles du Woigot, d'Avril, de Neufchef, du Chevillon et de Fontoy. Cette diversité de provenance ainsi que l'éloignement relatif des centres d'émission, est cause que le sondage de Tucquegnieux (AW), très favorisé sous le rapport de l'épaisseur, présente des différences de richesse assez grandes. C'est probablement un sondage de deuxième zone. La coupe se divise ainsi :

SONDAGE DE TUCQUEGNIEUX (AW).

1° $0^m,89$, bon calcaire ferrugineux (n'a été analysé qu'avec un banc supérieur de $0^m,38$ beaucoup plus pauvre). Le mélange a donné :

Fer : 28 — Chaux : 17 — Silice : 7 ;

2° $2^m,61$, minerai calcaire, contenant en moyenne :

Fer : 32 — Chaux : 15 — Silice : 5 ;

3° $2^m,59$, excellent minerai, avec :

Fer : 40 — Chaux : 8 — Silice : 6 ;

4° $0^m,60$ analogue au premier banc (en dessous, se trouve encore un banc de $1^m,16$ notablement ferrugineux).

Il convient de faire observer que, les échantillons ayant été mal réussis dans la traversée des parties riches, le produit analysé ne correspond peut-être pas tout à fait à la qualité de la couche, qui serait dès lors légèrement supérieure à celle qui résulte des chiffres ci-dessus.

Sondage de Mainville (BF). — Le sondage de Mainville (BF), plus près de l'émission ferrugineuse de Bonvillers,

Digitized by Google

donne une couche grise de 6^{m},03, dont la composition est la suivante :

Fer : 41 — Chaux : 11 — Silice : 6 — Alumine : 5.

La teneur en fer de certains échantillons, vérifiée au moyen d'essais par voie sèche, monte jusqu'à 46,5 p. 100.

La partie supérieure de la couche, sur 2^{m},47 d'épaisseur, donne un produit à 44 de fer, 6 de chaux et 5 de silice. Ces résultats superbes tiennent à la situation de la région de Mainville, dans la première zone de l'émission fournie par la faille de Bonvillers (Voir Pl. V et coupe n° V de la Pl. XI).

Profil de la couche entre Bonvillers et la Malmaison (Coupe V, Pl. XI). — Entre le sondage CS de Bonvillers et le sondage BF de Mainville, la couche dessine un anticlinal assez accusé. Il est hors de doute qu'il était beaucoup moins prononcé à l'époque de la formation de la couche, et que son relief actuel est dû à l'effondrement des terrains contigus à la faille de Bonvillers, du côté de l'Est. Avant l'effondrement, la couche formait tout au plus une légère saillie en ce point, et elle devait se rapprocher d'une position telle que celle qui est indiquée en pointillé entre le sondage BI et la faille, sur la coupe VI.

Dans la partie méridionale de ce profil, on remarque un appauvrissement très marqué de la couche à Mancieulles. Il existe là un anticlinal bien dessiné par les courbes 40 et 60, qui devait naturellement limiter la zone riche. Aucune concession n'a pu être établie sur cet anticlinal.

Profil entre Audun-le-Roman et Anoux. — Passons maintenant à la coupe VI, qui nous montrera le rôle de

Digitized by Google

la faille d'Audun-le-Roman. Elle montre la coulée régulière du minerai depuis la faille jusqu'à Tucquegnieux, point le plus bas où l'on constate le maximum de puissance; puis la diminution graduelle de la couche sur la pente inverse d'Anoux, jusqu'au seuil situé à la cote 40 environ, après lequel on arrive dans la région d'Ozerailles, complètement dépourvue de couche exploitable.

§ 7. — Région pauvre d'Ozernilles.

Cette région, qui forme la troisième zone du bassin de Tucquegnieux, a été reconnue par les deux sondages d'Anoux (BE), et d'Ozerailles (EY), suivant l'axe du synclinal et par les sondages d'Immonville (BA) et de Lixières (EC), suivant une direction transversale.

Voici, en résumé, les résultats de ces recherches.

Sondage d'Anoux (BE) (exécuté en 1895). — On ne trouve, dans les diverses couches, que de minces lits de minerais peu riches; aucun banc n'est exploitable. La partie la meilleure de la formation ferrugineuse est encore la couche grise où un banc de $0^m,75$, compris entre les profondeurs 218,65 et 219,40 (alt. 39,18 et 38,43) est assez bon et contient des filets de mine rendant 35 p. 100 de fonte à l'analyse par voie sèche.

Sondage d'Ozerailles (EY) (exécuté en 1899). — Aucune couche franchement délimitée; plusieurs zones minéralisées à 25 p. 100 de fer environ, avec quelques filets de mine plus riches, à 30 ou 35. Les analyses moyennes de plusieurs tranches, ayant paru les moins pauvres, et qu'il est impossible de dénommer, faute de caractères distinctifs, sont les suivantes, de haut en bas :

Digitized by Google

ÉPAISSEURS	FER	CHAUX	SILICE	OBSERVATIONS
4m,06	23	24	14	Niveau de la couche rouge, ou jaune ?
1 ,24	28	21	8	Niveau de la couche grise.
0 ,80	25	21	16	Couche brune ?
2 ,20	27	18	17	Couche noire ?

Sondage d'Immonville (BA) (exécuté en 1895). — Rien d'utilisable. On a remarqué seulement, dans la couche rouge, un lit de 0m,18, contenant : fer, 38; chaux, 9; silice, 9; sa faible épaisseur le rend inexploitable ; il est compris entre les profondeurs de 195,40 et 195,58 (alt. 53,30 et 53,12). La couche grise, dont le mur est à l'altitude 46,44, ne contient que de la marne ferrugineuse.

Sondage de Lixières (EC) (exécuté en 1898). — Pas de couches nettement délimitées, plusieurs tranches à 15 ou 20 p. 100 de fer ; résultats comparables à ceux du sondage EY, mais encore plus mauvais.

Du sondage EY, si l'on remonte aux sondages EA, EX, S, on retrouve une richesse croissante, parce qu'on se rapproche de la faille du Woigot. On est alors dans le bassin de l'Orne.

§ 8. — Région méridionale et orientale du synclinal de Tucquegnieux.

Pour rester dans le bassin de Tucquegnieux, suivons la coupe VII qui passe : 1° entre Anoux et Tucquegnieux; 2° près de Saint-Pierremont; 3° au nord de Neufchef, c'est-à-dire à peu près parallèlement aux failles d'Avril-Neufchef.

Digitized by Google

La coupe montre l'appauvrissement sur les bords surélevés de la cuvette (cote 260 dans la mine de Neufchef, où la couche, très calcaire, ne contient que 21 p. 100 de fer). L'amincissement en biseau ne se voit pas sur le profil; il aurait fallu le continuer encore plus loin, du côté de l'Est, au-delà de la vallée de la Fentsch, pour trouver les anciens affleurements. Vers l'Ouest (côté Norroy), la coupe finit en dessous de la faille de Norroy, dans la deuxième zone, encore relativement riche, du gisement de Mainville.

Les meilleurs minerais se trouvent, dans la coupe VII, au sondage BM de Saint-Pierrement (4^m,10, avec 37 de fer).

Ce sondage est compris entre deux autres, BN (Avril) et BL (Sart), où l'on a trouvé :

	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
BN.....	3^m,78	37	12	8
BL.....	3 ,87	41	9	7

La région d'Avril-Trieux, dans laquelle ces trois sondages sont situés, s'étend juste entre les failles d'Avril, du Chevillon et de Fontoy, que nous considérons comme nourricières. C'est cette même région que les recherches de 1883 avaient fait considérer comme stérile. Nous décrivons ces recherches plus loin.

Passé la frontière, les travaux de reconnaissance ou d'exploitation manquent trop complètement pour que l'on puisse donner, sur la région de Lommerange, aucune indication précise.

Faille de Neufchef. — D'après les résultats des travaux de mine situés au Nord de la faille de Neufchef, qui a relevé les terrains au Nord, il est probable que cette

Digitized by Google

faille n'a pas été très nourricière pour le bassin de Tucquegnieux ; elle l'a été davantage pour la région méridionale, située en aval, vers Moyeuvre, comme nous le verrons en étudiant le bassin de l'Orne.

Son tracé, qui est bien connu à la surface, est indiqué sur la Pl. V, tel qu'il figure sur les cartes allemandes. Son rejet à Neufchef est d'environ 50 mètres. Il n'est plus que d'une vingtaine de mètres auprès de la frontière, et il s'annule à la rencontre de la vallée du Chevillon.

Faille du Chevillon. — Différents puits ou sondages de recherches tentés dans cette vallée n'ont recoupé que des terrains bouleversés; il est donc naturel d'admettre qu'elle coïncide avec une faille d'une certaine importance, et ce serait cette dernière qui délimiterait les failles d'Avril et de Neufchef.

Faille d'Avril. — Celle-ci offre un rejet inverse de celui de la faille de Neufchef. On voit, sur le côté Sud, l'oolithe de Jaumont (bathonien inférieur), relevée pour former le plateau d'Avril, et, sur le côté Nord, le bathonien moyen fortement déprimé. Le rejet atteint jusqu'à 60 mètres. Après la rencontre de la faille du Woigot, l'accident se continue encore sur Lantéfontaine avec un rejet de même sens, décroissant graduellement vers l'Ouest, pour disparaître finalement à Génaville.

Anticlinal de Mancieulles-Anoux. — A l'intersection des failles du Woigot et d'Avril, la région de Mance-Lantéfontaine a été déprimée pendant que se soulevait celle de Mancieulles, où l'on voit un anticlinal bien accusé par les courbes 60, 50 et 40 de la Pl. V.

Le flanc oriental de cet anticlinal se raccorde par un petit synclinal à la région de Bettainvillers. Cette ondu-

Digitized by Google

lation, qui découle nécessairement de la comparaison des cotes de niveau de la couche à l'Est de Bettainvillers avec celles que l'on a trouvées à Mancieulles et la Malmaison, est d'ailleurs figurée encore aujourd'hui à la surface par l'allure du toit de l'oolithe de Jaumont, qu'on peut suivre assez commodément, de part et d'autre de la vallée de la Mance.

§ 9. — Région centrale.

Faille de Fontoy. — Il nous reste à parler d'une faille qui est isolée dans l'intérieur du synclinal d'Ottange-Tucquegnieux; c'est celle de Fontoy, dont la direction, toujours S. O.-N. E. dans l'ensemble, est légèrement retroussée vers le Nord, aux deux extrémités.

La partie septentrionale vers Angevillers a été bien déterminée par les auteurs allemands, et nous la représentons comme eux. Pour la partie située à l'Ouest de Fontoy, nous proposons un tracé nouveau qui a l'avantage d'expliquer un fait qui n'avait pas été bien éclairci jusqu'alors.

Entre les sondages ZZ, d'une part, où la couche grise est à la cote 67, et XA et YZ, où elle est à 146 et 130 (Voir *Annexe* A_6), il y a une différence de niveau de 70 mètres environ, que traduisent les courbes 70 et 140, sensiblement juxtaposées sur l'accident. Au Nord de la faille, l'allure concave des courbes 70, 80 et autres dessine, d'une façon continue, le synclinal d'Ottange. Jusqu'à quel cote le thalweg de celui-ci descend-il au Nord de la faille de Fontoy? C'est ce que le sondage YY, dit d'Elisabeth (dont nous avons eu connaissance par M. Engel, directeur de mines), permet de préciser. Le mur de la couche grise y a été rencontré à la profondeur de 199,55 et à la cote 41,20 (*Annexe* A_6). D'après cela,

Digitized by Google

nous sommes autorisé à continuer le synclinal d'Ottange par les courbes 60 et 40, telles qu'elles sont représentées sur notre carte; mais alors la branche occidentale de la courbe 60 vient se terminer en regard de l'altitude 65 environ du côté Sud; de sorte qu'à la frontière même la faille n'existe plus ; ce qui est bien conforme à la réalité.

Ce point méritait d'être éclairci pour répondre à la remarque que M. Kohlmann faisait (1898, *Stahl und Eisen*) à l'occasion du prolongement possible de la faille de Fontoy sur le territoire français.

M. Kohlmann faisait observer qu'avec un accident aussi important que la faille de Fontoy, il était tout à fait surprenant que le rejet constaté en Lorraine disparût à la frontière française d'une manière tellement rapide que les géologues français ne pouvaient plus le retrouver sur leur territoire.

Nous venons de voir comment la forme synclinale des assises donnait l'explication de cette anomalie apparente.

Pour apprécier le rôle de la faille de Fontoy au point de vue de la genèse des minerais, nous n'avons que les coupes publiées par M. Hoffmann, en 1896, dans *Stahl und Eisen*.

Les sondages XA et YZ, dans la région surélevée, et ZZ, dans la région abaissée, sont à peu près identiques quant aux épaisseurs $5^m,30$ à XA, $4^m,50$ à YZ, $5^m,25$ à ZZ (les renseignements sur les analyses manquent). Il faudrait conclure, d'après cela, qu'au moment de la formation de la couche grise la faille n'était qu'une crevasse sans rejet.

L'enrichissement des minerais dans les régions qui avoisinent la faille, tout au moins dans la partie orientale, semble se vérifier dès maintenant dans les travaux que la Société des Hauts-Fourneaux de Fontoy exécute pour mettre la mine d'Havange en exploitation. Dans la galerie qui traverse la concession de Guido pour accéder à

Digitized by Google

celle d'Havange, la couche grise avait une teneur de 37,5 en fer et 12 de chaux. En se rapprochant de la faille, on a pénétré de nouveau dans la couche par un fonçage qui a donné des produits sensiblement meilleurs. Il est infiniment probable que le même enrichissement se constatera plus tard, de l'autre côté de la faille, entre les localités de Fontoy et d'Havange.

(*La suite à la prochaine livraison.*)

Digitized by Google

BULLETIN.

STATISTIQUE DE L'INDUSTRIE MINÉRALE DE L'ESPAGNE EN 1900.

1° PRODUCTION DES CONCESSIONS.

SUBSTANCES MINÉRALES	CONCESSIONS en activité	OUVRIERS			MACHINES A VAPEUR		PRODUCTION	
		Hommes	Femmes	Enfants	Nombre	Force en chevaux	Poids	Valeur sur place
							tonnes	francs
Fer	537	21.372	220	1.814	175	4.007	8.675.749	37.994.605
Fer argentifère	8	182	»	62	4	26	26.348	333.305
Wolfram	7	236	47	15	2	14	1.958	501.670
Pyrite de fer	15	300	36	39	7	583	34.638	121.235
Pyrite arsenicale	1	70	»	»	»	»	515	2.575
Ocre	3	4	»	4	»	»	58	1.160
Terre alumineuse	15	26	8	8	»	»	420	10.500
Plomb	469	9.088	173	1.547	208	7.382	131.437	27.248.138
Plomb argentifère	350	7.438	801	1.016	200	6.550	182.016	34.376.448
Zinc	75	1.437	165	262	14	223	86.158	3.088.254
Or	2	92	»	»	1	5	1.300	39.000
Argent	6	243	»	51	5	139	742	655.340
Cuivre	305	8.638	191	1.034	45	876	2.714.714	46.230.067
Etain	3	86	45	13	»	»	47	35.815
Mercure	25	1.717	2	200	12	312	30.216	5.521.185
Antimoine	2	31	»	»	1	8	30	4.500
Manganèse	35	1.021	326	143	5	68	112.897	1.901.607
Sel commun	70	1.444	237	170	15	153	450.041	4.172.494
Substances salines	1	1	»	»	»	»	18	180
Sulfate de baryte	8	24	»	2	»	»	833	7.840
Argile	2	3	»	5	»	»	770	4.550
Spath-fluor	1	3	»	»	»	»	4	300
Soufre	9	439	»	60	2	10	64.364	549.733
Phosphore	4	60	4	3	»	»	4.170	92.950
Kaolin	8	53	4	14	»	»	3.794	40.171
Stéatite	6	97	7	19	»	»	8.109	234.020
Jais	1	3	»	»	»	»	2	250
Topaze	1	3	»	»	»	»	kilogr. 95,4	3.755
Houille	715	15,379	1.077	2.606	168	5.474	2.514.545	23.501.618
Lignite	53	847	31	108	4	50	91.133	507.337
Anthracite	2	584	12	29	4	90	68.427	1.190.076
Roches asphaltiques	5	46	»	»	»	»	4.193	43.160
Totaux	2.744	70.997	3.386	9.224	872	25.970	»	188.413.838

Digitized by Google

2° PRODUCTION DES USINES.

SUBSTANCES	PRODUCTION		NOMBRE des usines en activité	MACHINES EN ACTIVITÉ				OUVRIERS			MATIÈRES ÉLABORÉES
				Hydrauliques		A vapeur					
	Poids	Valeur à pied d'œuvre		Nombre	Force en chevaux	Nombre	Force en chevaux	Hommes	Femmes	Enfants	
	tonnes	francs									tonnes
Fonte	91.126	9.604.707									
Fer	54.307	13.359.892	15	23	1.150	278	26.529	9.134	182	1.009	622.212
Acier	144.355	24.156.543									
Fils de fer et d'acier	4.100	1.664.000									
Plomb	98.189	43.380.303	10	1	8	38	768	1.682	»	128	138.139
Plomb argentifère	74.341	30.622.130	20	»	»	14	320	1.047	»	132	173.597
Argent fin... (en kilogrammes)	99.901	12.023.382	2	3	36	»	»	42	»	2	676
Or..... (idem)	13	43.827	1	1	12	»	»	6	»	»	1.300
Cuivre fin	5	9.597									
Cuivre noir	29.652	38.396.293	13	»	»	33	900	3.795	178	371	1.586.562
Mattes de cuivre	18.159	7.263.640									
Zinc en lingots	2.855	1.998.920	1	»	»	13	134	518	6	29	14.430
Zinc laminé	2.756	2.563.080									
Mercure	1.095	7.396.667	7	»	»	4	54	300	3	302	25.007
Sulfure jaune d'arsenic	150	90.180									
Soufre fondu	750	90.000	4	»	»	»	»	»	»	»	1.372
Ciment hydraulique	185.811	2.113.626	40	28	483	24	731	559	23	86	517.408
Agglomérés de houille	341.156	7.928.453	11	»	»	12	389	576	7	63	318.562
Coke	381.000	13.583.529	15	»	»	18	539	541	3	66	556.883
Asphalte	2.331	158.011	4	1	30	2	38	44	»	2	2.357
Totaux	»	216.446.780	143	57	1.719	436	30.402	18.244	402	2.190	»

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

LE
GISEMENT DE MINERAI DE FER OOLITHIQUE
DE LA LORRAINE

Par M. François VILLAIN, Ingénieur au Corps des Mines.

(*Suite et fin*) (*).

CHAPITRE V (*Suite*).

BASSIN D'OTTANGE-TUCQUEGNIEUX.

DEUXIÈME SECTION

Couches accessoires dans le bassin d'Ottange-Tucquegnieux.

La couche grise, comme nous venons de le voir, couvre toute l'étendue du bassin. C'est de beaucoup la principale de celles que la formation ferrugineuse comporte.

Nous allons étudier maintenant d'une façon rapide la répartition des autres couches, qui méritent, vis-à-vis d'elle, le nom d'accessoires.

D'abord les couches inférieures. Nous désignons, sous cette expression générique, la couche brune, noire et verte.

Elles sont rarement représentées d'une façon distincte toutes les trois ; leurs caractères communs sont : 1° une couleur foncée tirant plus ou moins sur le vert ; 2° une

(*) Voir *suprà*, pages 113 et suiv.

Digitized by Google

teneur élevée en silice et une faible teneur en chaux (sauf quelques exceptions).

La plus profonde, autrement dit la plus ancienne de ces couches, est la verte, dans laquelle on remarque d'une façon constante la présence de la pyrite de fer, disséminée, ou en cristaux apparents.

§ 1. — Couches noires a l'Est de la faille de Crusnes.

Le fait le plus frappant de la distribution des couches inférieures dans le synclinal d'Ottange est leur accumulation au voisinage de la faille de Crusnes, qui est rendue palpable par la coupe d'ensemble I pour la Lorraine allemande (Pl. VII) et par la coupe XII (partie occidentale) pour le Luxembourg (Pl. IX). M. Dondelinger commente ainsi les données de cette coupe : « Les couches « brune et noire, inconnues au-delà du Mittelsprung (faille « entre Esch et Rumelange), deviennent de plus en plus « importantes à l'approche du pied, et au point le plus « bas du rejet d'Audun-Crusnes. » (*Notice de l'Exposition de* 1900.)

M. Dondelinger donne les analyses suivantes pour les couches brune et noire de la région luxembourgeoise :

	FER	CHAUX	SILICE	ALUMINE	PHOSPHORE
Brune...	41,06	4,10	12,90	6,89	0,88
Noire...	39,49	6,44	13,35	6,10	1 »

M. Palgen indique, pour les couches d'Audun-le-Tiche, la composition suivante :

	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE	ALUMINE
Brune...	4m,70	41,40	5,90	8,30	5 »
Noire...	3 ,90	40 »	6 »	12 »	6 »

Digitized by Google

L'extraction des couches inférieures à Audun-le-Tiche présente de l'intérêt en raison de leur teneur élevée en fer, qui permet d'enrichir un lit de fusion constitué principalement avec la couche grise trop calcaire et insuffisamment riche (33 p. 100 de fer, 15 de chaux).

A l'Ouest de la faille de Crusnes, nous avons déjà dit que les couches inférieures dans les mines de Villerupt et de Crusnes n'étaient pas exploitables.

Dans les différents sondages de A à J (sauf E et L, qui sont à l'Est de la faille) qu'on a exécutés de Bréhain à Fillières, on ne s'est pas toujours préoccupé de rechercher le faisceau inférieur.

Les sondages C, F, H et J sont les seuls qui aient donné des résultats positifs, à ce point de vue.

Ces résultats sont tous concordants.

Pas d'horizon exploitable (ni même discernable quelquefois) dans les couches brune et noire. Une couche verte pyriteuse bien formée et ayant la composition suivante :

SONDAGES	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE	ALUMINE
C.....	2m,10	31	9	11	10
F.....	1 ,55	33	11	11	7
H.....	1 ,15	35	10	16	10
J.....	2 ,42	36	6	18	7

Nous avons vu aussi qu'au sondage N de Serrouville, la formation était presque nulle, la couche verte seule y est représentée par un banc riche de 0m,80 avec : fer, 40; chaux, 4; silice, 10.

A ER, cette même couche a 1 mètre avec : 26 de fer et 30 de silice.

A BU, DN, DL, DM, les couches inférieures, extrêmement siliceuses, ne renferment rien d'utilisable.

Si nous revenons maintenant à l'Est de la faille de

Digitized by Google

Crusnes, nous voyons d'abord, en territoire français, les sondages E et L donner, en *mine noire :*

E : 3,75 avec fer 40, chaux 4, silice 16

et

L : 2,34 avec fer 34, chaux 5, silice 19.

Il résulte de tout ce que nous venons de dire que l'origine des mines noires doit se trouver sur la faille de Crusnes, entre cette localité et Audun-le-Tiche.

Faille de Crusnes. — C'est précisément là que la faille est le plus marquée; le rejet est de 100 à 120 mètres entre Crusnes et Audun-le-Tiche (Voir coupe XII, Pl. IX).

Dans cette dernière localité, on voit, en effet, sur la lèvre Ouest, les formations supraliasiques en contact avec les calcaires à polypier du bajocien supérieur sur la face Est. Le rejet a donc une amplitude égale au moins à l'épaisseur de l'étage bajocien.

L'émission ferrugineuse de Crusnes étant admise, rien de plus simple que d'expliquer la répartition des couches noires. Elles se terminent dans le Luxembourg, sur le bord relevé de la faille médiane, et leur extension vers le Nord est assez limitée, parce que le mur de la couche va en montant. Au contraire, vers le Sud-Est, l'épanchement gagne les points bas du synclinal d'Ottange, en descendant sur la ligne de plus grande pente, qui passe entre Aumetz et Ludelange (Voir, p. 205, la coupe du sondage YU); c'est de là que vient la richesse des sondages ZH, ZI, ZM, ZL, O, ZO, ZP, ZR, ZS, ZT, ZU, ZV (Pl. VIII), qui démontrent que le flanc occidental du synclinal est bien minéralisé. Dans la région d'Aumetz, on compte exploiter une couche de 5 mètres avec 38 à 40 de fer, 3 à 4 de chaux, 16 à 17 de silice.

Sur le flanc oriental du synclinal, les résultats sont tout autres.

Digitized by Google

La coupe YM n'indique pas de couches inférieures. Les coupes YS et YT n'en indiquent qu'une de 2m,22 et 2m,20, sans nous dire quelle est sa composition.

Mais nous pouvons combler cette lacune au moyen de la coupe du sondage d'Havange (YX), exécuté, en 1898, par la maison de Wendel.

Cette coupe est la suivante : on n'y trouve qu'une couche inférieure de 1m,45 avec des teneurs, sur échantillon choisi : en fer, 29,60 ; chaux, 8,40 ; silice, 24,40.

SONDAGE D'HAVANGE (YX).

DÉSIGNATION DES COUCHES	ÉPAISSEUR	ANALYSES		
		Fer	Chaux	Silice
Couche sableuse et calcaires marneux	8m »	»	»	»
Couche rouge	3 ,40	17 17	34 32	9 11
Bancs stériles ou pauvres	10 ,40	»	»	»
Couche jaune	2 ,40	46 24	5 24	7 11
Calcaires marneux	5 ,90	»	»	»
Banc ferrugineux	0 ,70	24	15	25
Bänkling (toit de la couche grise)	0 ,55	11	41	4
Couche grise	7 ,25	42 45 34	7 4 12	7 7 12
Marnes grises	6 ,15	»	»	»
Couche brune	1 ,45	30	8	24
Marnes verdâtres siliceuses	4 ,50	»	»	»
Couche verte	0 ,12	»	»	»

Puissance totale de la formation..... 50m,82.

Dans la partie méridionale du synclinal d'Ottange, les auteurs allemands ne signalent pas de couches inférieures exploitables. Si on utilise quelque peu la couche brune dans la mine de Neufchef, c'est uniquement pour servir de fondant siliceux à la couche grise trop calcaire.

Dans la région française, on connaît, au contraire, deux régions renfermant des couches inférieures exploitables.

Digitized by Google

§ 2. — Couches inférieures au Sud de la faille d'Audun-le-Roman.

En examinant un par un tous les sondages de ce bassin, nous sommes amenés à admettre une émission de minerais noirs près d'Audun-le-Roman, sur la faille du même nom.

En effet, tandis que les sondages DM, DN, ER, BU, situés au Nord de cette faille, ne présentent dans cet horizon aucune couche de quelque valeur, les sondages BK et BJ, au contraire, situés au Sud de la faille, c'est-à-dire en aval, donnent :

	Épaisseur	Fer	Chaux	Silice	Alumine
BK (Audun).....	3m,60	41	5	13	9
	0 ,75	42	2	21	10
BJ (Bazonville).....	3 ,15	39	8	15	7
	1 ,05	34	9	17	7

Vers l'Est, l'épanchement ferrugineux semble gagner à peine les sondages ZX et ZY, où les coupes allemandes ne nous montrent que 1m,47 et 1m,40 de couche (qualité non spécifiée).

Si nous partons de l'émission d'Audun pour descendre dans le synclinal vers les sondages BD, BH et BV, nous constatons que la couche s'y rencontre encore, mais avec une importance décroissante, savoir :

Sondages	Épaisseur	Fer	Chaux	Silice	Alumine
BD (Sancy).....	1m,07	32	15	11	6
	2 ,29	33	12	12	8
BH (Grand-Bois)....	1 ,48	28	13	20	5
	0 ,77	39	6	11	8
BV (Bois-la-Dame)...	0 ,99	34	7	14	7

Digitized by Google

A droite et à gauche de cette ligne, les sondages BQ, BP, BO, d'une part, BG, BB, DE, BC, d'autre part, ne fournissent plus que des traces des horizons inférieurs, où l'on ne trouve absolument rien d'utilisable.

Dans le voisinage de la faille de Bonvillers (sondages CS, BI, BF, AW), même pauvreté. Nous pouvons donc tracer la zone de richesse lenticulaire des couches inférieures d'Audun-le-Roman, comme on le voit sur la Pl. V.

§3. — Couches inférieures au Nord de la faille d'Avril.

On ne retrouve un lambeau de couches noires que dans la région déjà mentionnée comme riche en couche grise, à propos de la coupe VII au Nord de la faille du Chevillon.

Le sondage BL, à l'Est de Trieux, a donné, en effet, $2^m,78$ avec :

Fer : 37 — Chaux : 7 — Silice : 15.

A BM, le niveau de la couche n'a pas été atteint par le trou de sonde.

BR et BS ne donnent que $0^m,40$ et $0^m,80$ de couche.

BT ne donne rien, tandis que BN fournit :

$0^m,80$ avec fer : 31 — chaux : 15 — silice : 11

et

$0^m,75$ avec fer : 37 — chaux : 9 — silice : 12.

De même que pour la couche grise, nous sommes donc amenés à admettre qu'il y a eu émission, de la faille de Chevillon et de la faille d'Avril, non loin de la localité du même nom.

Digitized by Google

§ 4. — Couche jaune de la faille d'Ottange (région de Rumelange, Tetange, en Luxembourg).

La couche jaune n'est vraiment digne de retenir l'attention des maîtres de forges que dans la seule région de Rumelange, en Luxembourg.

Peut-être fournirait-elle quelques produits utilisables dans le thalweg du synclinal d'Ottange, près de Ludelange, mais ce n'est pas prouvé.

La comparaison des trois sondages de la maison de Wendel à Ludelange (YU), à Tressange (YV) et à Havange (YX) semble indiquer qu'il y a une couche jaune utilisable à l'Est de la faille d'Ottange, c'est-à-dire sur le côté abaissé. Toutefois, l'étude de cette couche est trop peu avancée pour qu'il soit possible d'en dégager une conclusion précise.

Au contraire, la mine jaune de Rumelange est exploitée et appréciée depuis longtemps.

La coupe XII nous indique qu'elle est située entièrement à l'Est de la faille médiane.

Voici ce qu'en dit M. Dondelinger (note originale) : « La couche jaune est inconnue au-delà du Mittelsprung, « versant d'Esch. Elle est bien développée au fond de « bateau que forment les courbes de niveau entre cette « faille et la vallée de Rumelange, s'étend au-delà de la « faille d'Ottange et disparaît vers Dudelange. » A l'appui de cette assertion, M. Dondelinger nous a fourni les deux coupes suivantes, faites aux points LG, LI. Au point LG, à l'Est de la faille, la couche existe et commence à devenir exploitable. Elle manque au point LI, situé à l'Ouest du même accident.

Il est probable que c'est à cause du relèvement des assises sur la lèvre occidentale que le dépôt de mine jaune est limité à la faille médiane.

Digitized by Google

La faille nourricière serait ici celle d'Ottange.

COUPE LG	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
Couche rouge sableuse	3m,00	19	7	50
Intervalle stérile	10 ,90	»	»	»
Couche rouge, pauvre	1 ,80	20	31	5
Intervalle stérile	5 ,00	»	»	»
Couche jaune	2 ,90	31	17	11
Intervalle stérile	1 ,60	»	»	»
Couche grise	3 ,20	29	21	8

COUPE LI	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
Couche rouge pauvre	2m,20	»	»	»
Intervalle stérile	10 ,30	»	»	»
Couche grise	3 ,90	38	7	16
Intervalle stérile	7 ,30	»	»	»
Couche brune	2 ,26	26	14	24

Aux points LF et LE (Kirchberg et Steinberg), la couche jaune a été trouvée avec 3 mètres de puissance, et la composition :

Fer : 33 — chaux : 12 — silice : 6.

Au point LD (Tetingerberg), elle est divisée en deux bancs, savoir :

	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE	ACIDE PHOSPHORIQUE
Couche jaune calcaire	1m.50	29	22	7	1,57
Calcaire marneux stérile	1 ,50	»	»	»	»
Couche jaune avec rognons calcaires ferrugineux	3 ,50	35	15	7	1,90

Par triage, la dernière permet de constituer un produit avec les teneurs suivantes :

Fer : 44 — chaux : 6 — silice : 8 — acide phosphorique : 2,14.

[*Notice relative à l'aliénation des terrains miniers de la fondation Augustin*, par M. LIMPACH, garde-mines à Rumelange (1898).]

Digitized by Google

Enfin, aux points LA et LC, versant occidental de la vallée de Dudelange, la couche jaune a encore respectivement 2m,46 et 3m,15, avec

Fer	35 / 40	Chaux	8 / 14	Silice	6 / 9

(Ban de Dudelange, mine de la Société des Hauts-Fourneaux de Dudelange.)

Ces indications permettent de conclure que la mine jaune du bassin de Rumelange a été formée par une émission sur la faille d'Ottange, située à hauteur de Tetange (Voir Pl. V).

§ 5. — Couche jaune d'Avril.

Au sondage BN, situé au Nord de la faille d'Avril, une couche jaune a été rencontrée, qui a la composition suivante :

a	Alternance de minerai marneux et de minerai riche, brun clair.....	0m,88
b	Calcaire marneux ferrugineux.....	0 ,20
c	Minerai brun riche.....	0 ,40
	Ensemble.....	1m,48

Le banc inférieur, de 0m,40, renferme 36 p. 100 de fer, 8 de chaux, 18 de silice et 6 d'alumine.

Au sondage P, la même couche existe, mais plus riche encore.

Dans les autres sondages d'alentour, elle n'est représentée, quand elle existe, que par un banc très pauvre. Il est probable qu'elle ne constitue qu'une lentille très peu étendue de part et d'autre de la faille d'Avril.

C'est surtout en raison de sa superposition à une lentille de couche noire, déjà signalée précédemment, dans la même région, qu'il y avait intérêt à la mentionner.

Digitized by Google

§ 6. — Couche rouge.

Il nous reste maintenant à examiner la couche rouge dans le bassin d'Ottange-Tucquegnieux.

Couche rouge de la région d'Esch. — Il convient d'abord de citer la région du Luxembourg, où elle est connue de longue date, sous le nom de mine d'Esch. C'est elle qui faisait dire autrefois (il y a trente ans), à M. Habets, professeur à l'École des mines de Liège, que le canton d'Esch était appelé à devenir le Cleveland du continent.

La limite d'exploitabilité de la couche rouge ne descend pas au Sud plus bas que la frontière allemande.

Les coupes que nous avons données plus haut de la formation aux points LG et LI montrent que la couche rouge n'y est déjà plus exploitable.

A Audun-le-Tiche, la couche semble encore utilisable, bien qu'on n'en tire parti que fort peu dans la mine de la Société des Aciéries d'Angleur.

Par contre, à Esch, elle est d'une qualité exceptionnelle. M. Dondelinger s'exprime ainsi à son sujet : « La couche « rouge calcareuse, d'une puissance de 2 à 3 mètres, « est d'une composition parfaite pour la fusion sans autre « mélange (minerai *selfsmelting*). Séparée des rognons « calcareux, la mine atteint 40 p. 100 de fer, 7 à 8 de « chaux et autant de silice. Elle a été la première à être « exploitée à Esch, ses affleurements s'étendant sur « une grande surface de cette commune. La couche se « termine en biseau vers le Nord-Est et devient inex- « ploitable à Dudelange. »

M. Dondelinger nous fournit encore les trois analyses suivantes, pour la spécification des mines rouges de la région d'Esch :

Digitized by Google

COUCHES	FER	CHAUX	SILICE	ALUMINE	PHOSPHORE
Rouge sableuse	27,63	4,93	41,96	4,57	0,72
Rognons calcareux de la mine rouge	22,88	23,85	7,28	4,46	0,67
Rouge triée	40,98	7,40	8,41	4,85	0,77

Dans la partie centrale du bassin d'Ottange, la mine rouge semble devoir être utilisable en quelques points. Nous mentionnerons en particulier le cas du sondage YU de Ludelange, où un échantillon a donné, à l'analyse, de très bons résultats (Voir coupe de ce sondage, p. 205).

A Ottange même, la Société des Hauts-Fourneaux de Rumelange exploite à la fois la couche rouge calcareuse et la couche rouge sableuse, concurremment avec les couches jaune et rouge, par un puits situé à l'Est de la faille d'Ottange, tout près de celle-ci. Le minerai de la couche sableuse est très curieux à observer. Il n'est pas oolithique; l'oxyde de fer ne fait qu'y enrober de petits grains de quartz. Tout près de la faille, la couche peut s'exploiter sur $3^m,50$ de puissance avec 34 de fer et 32 à 33 de silice. Lorsqu'on s'en éloigne, la puissance et la teneur en fer diminuent; on cesse d'exploiter les chantiers lorsqu'ils ne présentent plus qu'une couche de 2 mètres à $2^m,20$ avec 23 à 25 de fer.

Le contour de la partie exploitable figure une lentille plaquée contre la faille d'Ottange, sur la lèvre orientale. Il est très remarquable que sur la lèvre occidentale, qui est relevée, le minerai n'est pas utilisable. D'une façon générale, les couches sont meilleures à l'Est de la faille qu'à l'Ouest.

Enfin, on trouve dans la couche rouge sableuse d'Ottange des minerais noir bleuâtre riches, qui rappellent l'aspect de ceux qui ont été signalés dans le bassin de Landres au sondage de Joudreville DH.

Il est probable que, dans l'un comme dans l'autre cas,

Digitized by Google

la décomposition rapide d'un afflux considérable de carbonate de fer a engendré ces colorations.

§ 7. — Couche rouge d'Audun-le-Roman et de Bonvillers.

Les mines rouges siliceuses du bassin de Longwy ont été trouvées dans la partie méridionale de celui-ci, jusqu'aux sondages I et K, ayant donné, le premier, 3m,36 avec 35 de fer; le second, 2m,61 avec 30 p. 100.

Le sondage J n'a fourni que des résultats douteux; mais, plus à l'Ouest, FB et FG ont donné, l'un 1m,83 avec 19 de fer, l'autre 1m,82 avec 16. La silice monte à 32 et 43 p. 100 dans ces couches. Au sondage N, la couche n'existe pas; à ER, elle donne 2 mètres avec 18 de fer.

D'après cela, il semble légitime de dire que le bassin de Longwy se termine à la vallée de la Crusnes. Nous l'avons interprété ainsi dans les délimitations faites sur la Pl. V.

Ce n'est qu'aux sondages DL, DM et DN qu'on retrouve une bonne couche rouge (la seule qui puisse être utilisée dans ces sondages); elle offre la composition suivante :

SONDAGES	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
DL (Mercy-le-Haut)	4m,08	37	12	10
DM (Murville)	0 ,97	36	14	8
	0 ,93 stérile	»	»	»
	1 ,65	35	12	10
DN (Malavillers)	2 ,85	30	16	12

Depuis DL, la couche se poursuit, en descendant, jusqu'à DK par CV et DC. Mais elle diminue peu à peu de valeur.

CV 1m,35 — 33 de fer — 12 de chaux;
DK 1 ,98 — 30 de fer — 21 de chaux.

Digitized by Google

Dans tout le bassin de Landres, elle n'a aucune valeur, en particulier à EL, CR, CH, CF.

A CR, elle n'a que 1m,50 avec 24 de fer (Voir coupe, Pl. X); mais il suffit de franchir la faille de Bonvillers pour la retrouver excellente aux sondages CS, DF, DE, où elle est représentée par :

SONDAGES	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
CS	2m,30	36	15	6
DF	2 ,20	33	16	6
DE	3 ,06	33	13	9

Le sondage DC serait situé en deuxième zone par rapport aux trois qui précèdent, si l'on en juge par l'épaisseur de la couche et l'importance des parties calcaires.

Au total, elle a, en effet, 5m,73 de puissance, avec : fer, 28; chaux, 18; silice, 10. La répartition de la mine riche et du calcaire est très inégale. Dans la coupe détaillée de la formation, on remarque 3 carottes donnant 33, 37 et 46 p. 100 de fer, intercalées malheureusement au milieu de bancs calcaires à 20 p. 100.

Dans les sondages BI, BH, BP, BQ, qui sont tous situés à peu près sur une même ligne de niveau, la couche est insignifiante; mais, à BD et à BB, elle redevient digne d'attention. Dans ce dernier sondage, elle a 0m,75 avec : fer, 35; chaux, 12; silice, 12.

Enfin, en se rapprochant de la faille d'Audun-le-Roman aux sondages BG, BK, BJ, on a obtenu les résultats ci-après :

SONDAGES	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
BG (Malavillers)	1m,40	38	12	8
BK (Audun-le-R.)	1 ,25	39	10	11
BJ (Bazonville)	1 ,35	35	16	12
	0 ,66	34	23	10

Digitized by Google

Chose extrêmement rare dans le bassin de Briey, le niveau des calcaires ferrugineux du sondage BK renferme lui-même un banc très riche ainsi constitué :

		Fer	Chaux	Silice
Partie supérieure.	2m,15	37	13	10
Partie inférieure..	1 ,60	31	19	9

Il n'est donc pas douteux qu'il y a eu une émission sur la faille d'Audun-le-Roman, à proximité de BK.

Il est très probable aussi qu'il y en avait une non loin du sondage CS, sur la faille de Bonvillers.

La première est d'autant plus certaine que, dans les couches sous-jacentes (jaune, grise, noire, verte), c'est dans son voisinage qu'on trouve aussi le maximum de richesse. Et, si on compare la coupe du sondage BK, représentée sur la Pl. X, à celle du sondage DN qui en est très voisin, on ne pourra manquer d'être frappé par les grandes divergences qui existent entre elles. Au sondage BK, la formation ferrugineuse a 50 mètres d'épaisseur et six horizons très bien minéralisés; en DN, au contraire, on ne trouve, dans une formation de 40 mètres, qu'un seul horizon, celui de la couche rouge, convenablement minéralisé.

La faille d'Audun-le-Roman, qui passe entre les deux, est la cause de cette différence. Ce sont les flux ferrugineux qui descendaient la pente du synclinal qui ont minéralisé et augmenté l'épaisseur des sondages d'aval, tels que BK, BJ.

A BJ, la formation a 55 mètres d'épaisseur, tandis qu'à ER, de l'autre côté et en amont de la faille, elle n'a que 36 mètres.

La faille de Bonvillers donne lieu à la même remarque; deux sondages très rapprochés, mais séparés par la cassure, CR et CS (Voir pl. X), ont rencontré des épaisseurs de formation ferrugineuse très différentes, 52 mètres à CS,

Digitized by Google

sur le côté de la faille qui s'est enfoncé, et 33 mètres seulement à CR.

Rappelons que des différences analogues se constatent, à Audun-le-Tiche, de part et d'autre de la faille de Crusnes (Voir Pl. IX) et, à Avril, de part et d'autre de la faille d'Avril (sondages BN et P de la Pl. X).

Ces faits ne peuvent s'expliquer qu'en admettant que les failles et les plissements ont commencé à se former avant les dépôts de minerais.

§ 8. — Couche rouge d'Anoux et du Chevillon.

On retrouve encore une couche rouge bien constituée :

1° Au Nord-Est d'Anoux ;

2° Près de la vallée du Chevillon.

La première s'explique par une émission venue par la faille du Woigot, à son extrémité septentrionale.

La forme synclinale du fond de la mer, de Mancieulles vers Anoux, d'une part, et vers Bettainvillers, d'autre part, explique pourquoi les minerais se sont rassemblés dans ce bas-fond. Tandis que AV, BE, BA ne donnent pas ou presque pas de couche rouge, on trouve à EZ, AW, BS, les résultats suivants :

SONDAGES	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
EZ (Anoux)	2m,71	39	10	6
AW (Tuequegnieux)	0 ,73	33	15	11
	1 ,25	»	»	»
BS (Bettainvillers)	1 ,40	35	12	8

A AZ, on trouve encore 2m,45, avec : fer, 31 ; chaux, 10 ; silice, 14. A BT, BR, il n'y a plus rien d'appréciable.

Au Chevillon, les sondages BL et BM ont donné les résultats suivants :

Digitized by Google

BL (Sart) : épaisseur, $1^m,60$; analyse sur un échantillon : fer, 37 ; chaux, 15; silice, 5.

BM (Saint-Pierremont) : épaisseur, $2^m,65$, avec : fer, 33; chaux, 11 ; silice, 16.

Enfin, au sondage BN (Avril), on a obtenu $0^m,63$, avec : fer, 39; chaux, 13; silice, 10. Nous retrouvons encore, dans les sondages de cette région, et spécialement à BM et BL, les enrichissements déjà signalés en couches noire et grise (on verra plus loin, troisième section du présent chapitre, les résultats intéressants d'un sondage exécuté, en 1875, au Sud de BM, dans la vallée du Chevillon).

La concordance des résultats favorables dans tous les horizons donne à penser que la faille du Chevillon joue un rôle important dans la genèse des minerais de cette région.

Plus à l'Est, la faille de Neufchef a donné aussi une couche rouge dont on a tiré parti pendant quelque temps dans les exploitations de MM. de Wendel. Il serait difficile d'apprécier le rôle de la faille de Neufchef dans la genèse de la couche rouge d'après cette exploitation, fort peu développée. La valeur des minerais était d'ailleurs assez médiocre.

TROISIÈME SECTION.

Recherches infructueuses de 1882-1883 dans la région d'Avril-Trieux-Sancy.

Nous nous proposons simplement de rappeler ici, en quelques mots, les recherches infructueuses faites, le long de la frontière, d'Avril à Sancy, en 1882-1883.

Sondage de Sancy (1882). — Profondeur, $196^m,67$. Il est entré dans la partie supérieure (zone des calcaires ferru-

Digitized by Google

gineux) de la formation et a été abandonné après y avoir pénétré de 11m,85.

Le sondage se trouvait à l'Est de Sancy-le-Bas, tout près du village; en raison de son emplacement, qui correspond sensiblement au centre du triangle formé par BJ, BD, BQ, il aurait dû trouver des couches exploitables dans la zone des mines rouge, grise et verte. Mais il n'a même pas atteint l'horizon de la couche rouge.

Le tableau suivant indique les profondeurs qu'occupent, dans la formation, les murs de ces trois couches.

INTERVALLE ENTRE LE TOIT DE LA FORMATION ET LE MUR DES COUCHES.

AUX SONDAGES	ROUGE	GRISE	VERTE
BJ	24m	37m	55m
BD	18	32	48
BQ	21	30	46

Il n'est donc pas étonnant que la recherche ait été considérée comme négative, puisqu'elle n'a même pas atteint la première couche.

Sondage de Saint-Pierremont (1883). — Profondeur, 200m,69. Il était situé à peu près à égale distance entre les sondages BL et BM. Il aurait donc dû trouver, d'après les indications de la Pl. V, les couches rouge, grise et verte. Les murs de ces couches sont aux profondeurs suivantes, en dessous du toit de la formation :

AUX SONDAGES	ROUGE	GRISE	VERTE
BL	14m	26m	37m
BM	15	21	non atteinte

Or voici la coupe qui a été donnée du sondage :

Digitized by Google

Coupe originale.

Sable gris très fin	2m,03
Calcaire très ferrugineux	0 ,02
Sable brun très fin	10 ,35
Calcaire marneux	0 ,50
Minerai brun marneux inexploitable (*niveau de la couche rouge*)	*1 ,87*
Marne schisteuse micacée	1 ,30
Calcaire ferrugineux et coquillier	0 ,05
Minerai très marneux inexploitable	1 ,68
Sable gris très fin (*niveau de la couche grise*)	*6 ,21*
Marne bleue compacte micacée	6 ,35
Minerai brun calcareux et alumineux pauvre	2 ,05
Minerai à grains très fins (*niveau de la couche noire*) renfermant beaucoup de fer, mais siliceux	*3 ,60*
Marne verdâtre	16 ,48
TOTAL	52m,49

Il n'y a aucun doute que toutes les couches de minerai ont été traversées entièrement et qu'on a même exploré le mur de la formation sur une douzaine de mètres.

L'insuccès de la recherche doit être attribué au défaut de surveillance du sondage, qu'on exécutait au trépan plein, sans prendre de carottes. Il est d'ailleurs bien clair que, si on avait analysé les matières du curage avec tant soit peu de soin, on n'aurait pas manqué d'être frappé par la composition de la couche grise.

Sondage d'Avril (1883). — Profondeur, 175m,20. Il était situé entre le sondage BN et le village d'Avril.

Voici la coupe qui a été donnée :

Digitized by Google

Calcaires ferrugineux très marneux et inexploitables.....	6m,50	18m,65
Calcaires ferrugineux	8 ,00	
Marne bleue avec rognons calcaires.....	1 ,60	
Minerai rougeâtre.....	2 ,55	
Sable ferrugineux très fin (niveau de la couche grise)	*3 ,00*	
Bancs de calcaire bleuâtre séparés par des bancs de marne bleue	6 ,35	
Minerai gris (niveau de la couche verte).....	*3 ,20*	
TOTAL....	31 ,20	

Or, si nous nous reportons à la coupe du sondage BN, où le mur de la couche grise est à 20 mètres dans la formation, il ne peut y avoir aucun doute que le banc de 3 mètres qualifié *sable ferrugineux très fin* représente la couche grise ; de même le banc qualifié *minerai gris* représente la couche verte rencontrée à BN, à une trentaine de mètres dans la formation. Il est d'autant plus inconcevable que ce sondage n'ait pas retenu l'attention de la Société qui l'avait entrepris, que les analyses faites sur les produits retirés du trou de sonde étaient très encourageantes.

En effet, la couche de 2m,55 (niveau de la couche jaune) a donné les résultats suivants :

Fer	33,46
Chaux.....	12,30
Silice	15,35

et la couche inférieure, de 3m,20 :

Fer	36,65
Chaux.....	4,90
Silice	23,25

Malheureusement, faute de carottes, l'échantillon prélevé

Digitized by Google

dans le banc de 3 mètres, qualifié sable ferrugineux très fin (en réalité, la couche grise), devait être très impur, car il n'a donné à l'analyse que :

Fer	25,41
Chaux	17,50
Silice	20,50

M. l'ingénieur en chef Genreau, appréciant les résultats de ce sondage, s'exprimait ainsi dans un rapport du 18 juillet 1883 :

. . . . . .

« Les résultats fournis par ce sondage sont assurément d'un grand intérêt, et la formation ferrugineuse qui a été traversée semble présenter dans son ensemble des variations analogues à celles observées dans la région de Villerupt et d'Hussigny, attendu qu'elle montre de même, dans sa partie supérieure, un étage puissant de calcaires ferrugineux ; dans sa partie moyenne, une bonne couche de mine dont la gangue est principalement calcaire, et, à sa base, une assise plus riche en fer, mais de nature essentiellement siliceuse.

La puissance totale de la formation et les épaisseurs des diverses couches de minerai sont assez considérables pour qu'il y ait grande probabilité que le gisement s'étend assez loin dans les environs du sondage ; mais, en l'état actuel des choses, on est loin d'être fixé sur l'allure de ce gisement, qui apparaît pour la première fois à une grande profondeur au-dessous du plateau d'Avril, dans une région non encore explorée et à plus de 3 kilomètres, en ligne droite, de la zone des affleurements de la formation ferrugineuse dans la vallée du Conroy.

. . . . . .

Cette région est d'ailleurs traversée par de nombreuses failles dont une, celle qui va d'Avril à Neufchef, semble passer à peu de distance au Sud de ce dernier son-

Digitized by Google

dage, et ces accidents statigraphiques, qu'il importerait de bien reconnaître, commandent nécessairement une grande réserve et font qu'un seul sondage est réellement insuffisant à éclairer sur l'allure des gisements.

Les résultats encourageants d'un premier travail ne peuvent que stimuler de nouvelles recherches dans une région non encore explorée et qui semble promettre pour l'avenir; mais ils ne sauraient suffire, dès aujourd'hui, à motiver l'institution d'une concession de mine, qui serait octroyée sans que l'on connaisse rien encore de l'allure des gisements au-dessous du plateau d'Avril.

. . . . . .

Ces gisements des plateaux, situés loin des affleurements et à de grandes profondeurs, devront être exploités sous l'eau et par puits, et ils nécessiteront dans l'avenir de grands frais de première installation; il importerait, dès lors, que les concessions octroyées eussent de plus grandes étendues que sur la zone des affleurements, et il est de l'intérêt des concessionnaires eux-mêmes que l'allure des gisements soit bien reconnue par des recherches multipliées, pour que les concessions leur soient octroyées en connaissance de cause et ne les exposent pas à des dépenses considérables et improductives. La bonne règle serait donc, pour ces concessions de l'avenir, qui porteront sur les gisements des plateaux, situés sous l'eau et à de grandes profondeurs, d'octroyer des superficies plus grandes, mais d'exiger, par contre, des recherches plus complètes, plutôt que d'accorder une concession restreinte, d'après les données d'un seul sondage n'éclairant que sur l'allure des gîtes.

Les résultats du sondage d'Avril sont assez encourageants pour que la société qui en est l'auteur n'hésite pas à poursuivre ses recherches dans la région d'Avril. »

. . . . . .

La Société intéressée n'a rien fait, malheureusement,

Digitized by Google

pour répondre au programme que M. l'ingénieur en chef Genreau lui traçait avec tant de clairvoyance, dès 1883, et il a fallu que dix années se passent pour que d'autres explorateurs, dédaignant la légende qui courait sur l'inexploitabilité de la région d'Avril-Trieux, rétablissent les choses dans leur vérité, au grand avantage de la sidérurgie française. C'est pour récompenser leur initiative que le décret institutif de la concession de Chevillon leur a reconnu le droit d'inventeur prévu par l'article 16 de la loi du 21 avril 1810 (indemnité fixée à 200.000 francs).

Sondage du Chevillon ou du fond Gravin (1883). — C'est comme une véritable fatalité qui a pesé sur toutes ces recherches de l'année 1883. Les trois que nous venons de rapporter sont l'œuvre de trois Sociétés différentes. La suivante a été faite par une quatrième Société qui a montré, dans l'espèce, le même défaut de perspicacité.

Ce sondage a été poussé jusqu'à la profondeur de 93^{m},70. Il est situé dans la vallée du Chevillon, à 1 kilomètre au Sud environ du sondage BM et à 200 mètres au Nord d'un sondage exécuté dans la même vallée, en 1875, par MM. Jahiet, Gorand, Lamotte et Cie, maîtres de forges, en instance pour l'obtention de la concession de Bois-d'Avril. Leur sondage, poussé jusqu'à la profondeur de 103^{m},80, avait rencontré la formation ferrugineuse suivante (traversée incomplète, couche grise non atteinte) :

Calcaire ferrugineux.....	5^{m},00	12^{m},90
Calcaire ferrugineux avec minerai.	1 ,75	
Calcaire ferrugineux.....	3 ,40	
Couche de mine.....	2 ,75	
Minerai calcareux pauvre.....	0 ,80	

D'après ce que nous avons vu plus haut (couche rouge de BL et BM située à 14 ou 15 mètres de profondeur dans la formation), il est bien certain que le banc de

Digitized by Google

2m,75 de la coupe précédente représente la couche rouge.

Des analyses faites sur des échantillons de cette couche ont donné :

	PARTIE SUPÉRIEURE	PARTIE MOYENNE	PARTIE INFÉRIEURE
Fer	43,72	44,90	43,60
Chaux	3,88	4,52	4,52
Silice	6,24	10,04	5,96

Ces résultats très beaux, et qui tendent à prouver que la couche rouge de la région Avril-Trieux est d'autant meilleure qu'on se rapproche de la faille du Chevillon, fournissent un argument de plus pour la considérer comme nourricière.

Comment se fait-il qu'après ces recherches couronnées de succès le sondage du fond Gravin n'ait rien trouvé? Cela tient à ce que les niveaux géologiques ont été très mal interprétés par le sondeur.

La coupe entière du sondage a, en effet, été présentée comme suit :

Coupe originale.		Observations critiques.
30m,88	Calcaires et marnes (morts-terrains).	Ces assises appartiennent toutes au bajocien.
4 ,18	Marnes grises, considérées comme toit de la formation.	Les 16m,59 de marnes jaunâtres constituent la partie inférieure de cet étage, dont les bancs sont toujours ocreux.
16 ,59	Marnes jaunâtres, considérées comme « place du gisement ferrugineux ».	
29 ,35	Marnes liasiques.	En réalité, marnes infrabajociennes. Le sondage a été arrêté à la base des marnes micacées qui forment le toit de la formation ferrugineuse dans laquelle on n'a pas pénétré.
12 ,70	Argiles bleues qualifiées « marnes médioliasiques inférieures au gisement ferrugineux ».	
TOTAL.. 93m,70		

Digitized by Google

Conclusion. — La conclusion qui s'impose après cet exposé des erreurs répétées commises par les explorateurs de 1883, au grand détriment de l'intérêt général, c'est qu'on ne saurait prendre trop de soin dans le contrôle des sondages, et que la nécessité de constituer des dossiers de recherches minutieusement détaillés, comme le modèle $A_1A_2A_3$ donné aux *Annexes* de ce mémoire, est un stimulant précieux qu'on ne doit pas dédaigner.

CHAPITRE VI.

BASSIN DE L'ORNE.

PREMIÈRE SECTION.

Couche grise.

§ 1. — Failles nourricières du bassin.

Les couches de minerai qu'on rencontre dans ce bassin dépendent principalement des failles de l'Orne, d'Avril-Neufchef et du Woigot, et accessoirement de celles de Rombas et de Montois.

Les failles d'Avril-Neufchef, de l'Orne et de Rombas appartiennent au système N.E.-S.O. ; celles du Woigot et de Montois, au système N.O.-S.E.

La région d'Auboué-Homécourt-Jœuf est déprimée par les quatre dernières, d'une trentaine de mètres environ, sauf à l'extrémité Sud-Ouest, où le rejet n'est que de 10 mètres. Le compartiment ainsi enfoncé a la forme d'un rectangle allongé du N.-E. au S.-O., que la Pl. V fait nettement ressortir.

C'est dans cette région déprimée que les puits d'Homécourt et d'Auboué ont été foncés récemment au milieu

Digitized by Google

de niveaux aquifères considérables, dont l'existence ne s'explique que trop par cette particularité topographique.

La direction moyenne de la faille de l'Orne est N. 53° E. C'est suivant cette même direction que se développe le bassin minier depuis Rosselange jusqu'à Brainville-en-Woëvre.

La faille du Woigot affecte une direction sensiblement perpendiculaire à celle de l'Orne, soit : N. 33° O.

Les deux failles de l'Orne et du Woigot, ainsi que celles qui s'y rattachent latéralement, ont formé les vallées arrosées par les cours d'eau du même nom, dont les flancs abrupts sont alignés suivant des lignes de fracture.

Dans les assises marneuses du bathonien moyen et supérieur (région d'Hatrize-Conflans), le dessin des fractures originelles est très estompé par l'adoucissement des reliefs de surface. Il est, au contraire, resté très net dans la région comprise entre Moineville et Moyeuvre, où il est vivement buriné dans les calcaires de l'oolithe.

Faille de l'Orne. — La faille de l'Orne, dont le rejet se fait vers le Sud, reste bien visible à la surface jusqu'au-delà d'Auboué. Insignifiant à Rosselange, le rejet a une amplitude de 6 mètres environ à la frontière. Il augmente brusquement à hauteur de la faille de Montois et atteint une amplitude d'une trentaine de mètres qu'il conserve jusqu'à Auboué. L'extension occidentale de la cassure prête à un peu d'indécision. Nous l'avons arrêté à Moineville, à cause de la courbe 60 de la couche grise, qui recoupe la direction de la faille sans dénoter de dénivellation ; mais peut-être la cassure est-elle ouverte en ce point, et même plus loin, jusqu'à Hatrize, sous forme de diaclase.

Digitized by Google

Faille de Rombas. — La faille de Rombas a son rejet, au contraire, dirigé vers le Nord, et il est à peu près de la même importance, dans le voisinage de Montois, que celui de l'Orne. De là vient que la courbe 160 de la formation est à peu près continue sur la Pl. V.

On peut suivre cette courbe depuis Avril jusqu'à Saint-Privat et constater qu'elle dessine une concavité très prononcée vers l'Ouest; c'est la conséquence de la forme synclinale du bassin de l'Orne.

A l'Est de la courbe 160, les courbes 180, 200, 220 ont pu être établies très exactement au moyen des travaux d'exploitation des mines de Moyeuvre et d'Hayange. Le petit anticlinal, que traduit l'allure contournée en forme d'S de la courbe 220, est certainement un accident non contemporain du dépôt de minerai, de même que les failles de Ranguevaux et de Moyeuvre-Petite. Ces accidents, postérieurs à la formation des couches, sont un exemple des perturbations nombreuses que le gisement a subies sur sa périphérie et qui rendent l'étude des couches d'affleurement si peu commode.

Vers l'Est, la faille de Rombas a un rejet qui atteint 40 mètres. Il se réduit, à l'Ouest, à une quinzaine de mètres.

Failles de Neufchef et d'Avril. — Les failles de Neufchef et d'Avril ayant été étudiées précédemment à propos du bassin d'Ottange-Tucquegnieux, nous n'y reviendrons pas ici.

Failles du Woigot et de Sainte-Marie. — Ces deux failles sont quelquefois désignées sous le nom unique de Briey.

Le tracé de la faille du Woigot, entre Mance et Briey, est bien indiqué par la vallée qui s'étend entre ces deux localités. Il règne plus d'incertitude sur son trajet central : celui que nous avons adopté épouse une

Digitized by Google

dépression du sol très accentuée, au sud de Briey, à un peu moins de 2 kilomètres de cette ville, sur le parcours de la route de Longwy à Pont-à-Mousson.

Il rencontre la faille de l'Orne à l'extrémité occidentale du tunnel d'Auboué (ligne de Conflans à Homécourt).

Il est bien établi que la faille ne passe pas dans la vallée suivie par le Woigot à Moutiers, vallée qui serait due simplement à l'existence d'une diaclase latérale à la faille principale.

Le rejet de celle-ci se fait vers l'Ouest; mais il est difficile de préciser exactement son importance. On sait seulement qu'il diminue du Nord au Sud.

Nous appelons faille de Sainte-Marie celle qui est située à peu près dans le prolongement méridional de la faille du Woigot.

Elle débute, au tunnel d'Auboué, avec 2 ou 3 mètres de rejet. La dénivellation augmente vers Coinville, où elle paraît atteindre une dizaine de mètres. La faille vient se terminer près de Sainte-Marie-aux-Chênes, après avoir rencontré celle de Rombas à peu près à angle droit.

§ 2. — Digression sur le bassin de Saint-Privat-Novéant.

Failles de Roncourt et de Flavigny-Montigny. — Les failles de Roncourt et de Flavigny-Montigny sont décrites par les auteurs allemands avec des rejets, la première, d'une vingtaine de mètres vers le Nord; la seconde, de 15 à 20 mètres vers le Sud.

Ces deux failles, qui font partie du système N.E.-S.O., sont recoupées par une faille du système N.O.-S.E., dite d'Amanvillers.

La faille de Flavigny-Montigny et celle d'Amanvillers n'intéressent pas la constitution du bassin de l'Orne;

Digitized by Google

elles appartiennent au cinquième bassin, que nous avons désigné plus haut sous le nom de bassin méridional ou de Saint-Privat-Novéant, dans lequel on ne peut songer à exploiter que les couches inférieures. M. Greven a donné, dans sa description de ce bassin, parue en 1898 dans *Stahl und Eisen*, une coupe Est-Ouest, entre Plesnois et la frontière (coupe XI), que nous jugeons inté-

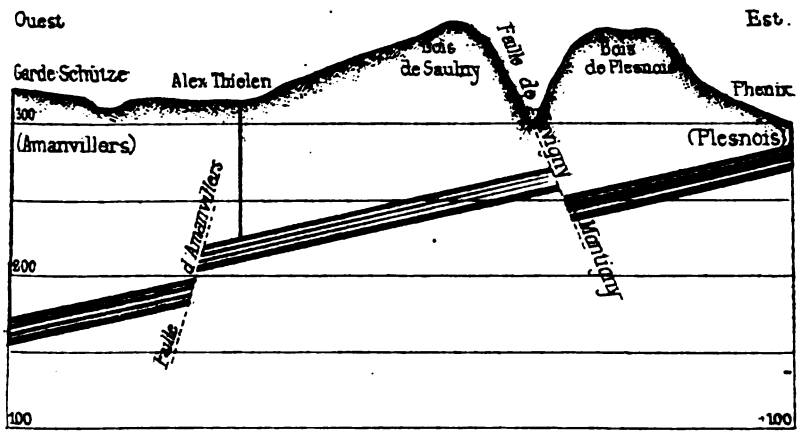


FIG. 5 (d'après M. Greven).

ressant de reproduire (*fig.* 5). Un coup d'œil jeté sur les couches qui y sont représentées conduit forcément à admettre que la faille de Flavigny a été nourricière.

Mines de la région d'Ars-sur-Moselle (*vallée de la Mance*). — Dans la région inférieure de la vallée de la Mance, non loin de la localité d'Ars-sur-Moselle, se trouvent les exploitations de Gorgimont et de Saint-Paul, d'où l'on a tiré autrefois les meilleurs minerais du bassin. On a exploité à Gorgimont une couche de $1^{m},80$, contenant de 37 à 42 de fer et une proportion très notable de chaux. Les mines sont situées de part et d'autre de la

Digitized by Google

Mance ; on a observé que la qualité et la puissance des couches diminuaient au fur et à mesure que les travaux s'écartaient de la vallée. Il semble logique d'en conclure qu'une émission ferrugineuse s'était produite en ce point par la fracture qui a donné naissance plus tard à la dépression qu'a suivie le cours d'eau. Le mur de la couche ferrugineuse affecte une allure nettement synclinale ; les minerais d'affleurements, qui étaient les meilleurs, se trouvaient à la cote 220 environ, aussi bien à Gorgimont qu'à Saint-Paul. Dans l'une et l'autre des mines, la couche remonte sous les plateaux d'une manière graduelle, jusqu'à la cote 245, où elle devient inexploitable.

Nous bornons à ces quelques mots ce que nous voulions dire du bassin d'Ars-Novéant. Revenons maintenant au bassin de l'Orne.

Nous ne citons que pour mémoire la faille de Coinville, parallèle à celles de l'Orne et de Rombas, et située entre elles. Elle ne joue qu'un rôle accessoire dans la répartition des minerais ; son rejet maximum vers Coinville reste au-dessous de 10 mètres.

Même observation pour la faille de Saint-Privat, qui serait située entre les parties des courbes 200 et 180 comprises entre la faille de Roncourt et celle de Rombas.

Pour ne pas compliquer la carte de la Pl. V, nous ne les avons pas tracées. Nous avons figuré, au contraire, la faille « Lothringen », entre celles de l'Orne et de Rombas, entre les courbes 160 et 180, qui n'a qu'une importance insignifiante ($1^m,50$ de rejet), mais qui complète la physionomie de la région d'Auboué-Jœuf, découpée par les failles de Sainte-Marie et de Montois, du même système.

Digitized by Google

§ 3. — Coupe longitudinale du bassin de l'Orne.

Synclinal de Brainville. — Nous avons vu que le bassin de l'Orne, dans sa partie orientale, affectait la forme d'un synclinal unique, dont la courbe 160 nous a permis de suivre un horizon à peu près continu.

A l'extrémité occidentale de la faille de l'Orne et à l'Ouest de celles du Woigot et de Sainte-Marie, les efforts dynamiques auxquels l'écorce terrestre a été soumise se traduisent par un plissement énergique, dont la courbe 40 indique la naissance. Bien prononcé sur la courbe 20, il devient extrêmement caractérisé aux courbes 0, — 20, — 40, — 60.

D'après la théorie, on doit s'attendre à ce que la zone riche de la formation ferrugineuse se trouve dans le synclinal. C'est ce que les recherches ont démontré d'une façon constante.

Comparons, en effet, les résultats des sondages AG et AF, AO et AE, AN et AM, AT et AL.

Nous allons voir que les premiers sont beaucoup plus riches que les seconds :

SONDAGES	ÉPAISSEURS	FER	CHAUX	SILICE	OBSERVATIONS
AG.....	2m,98	40	10	8	Dans le synclinal.
AO.....	2 ,72	37	14	6	—
AN.....	5 ,00	38	11	6	—
AT.....	2 ,85	37	8	8	—
AF.....	1 ,35	34	16	11	Sur l'anticlinal.
AE.....	1 ,61	35	12	7	—
AM.....	2 ,50	30	17	9	—
AL.....	1 ,54	23	18	14	—

Digitized by Google

§ 4. — Région de Moyeuvre-Neufchef.

La ligne qui joint AF, AN, AG se prolonge vers l'Est par Moineville, Auboué, Homécourt, Jœuf, Moyeuvre et Rosselange, c'est-à-dire dans toute la vallée de l'Orne, et ne jalonne que des sondages riches.

Aux affleurements de Rosselange, la faille de l'Orne s'évanouit; la couche grise n'y présente plus qu'une importance insignifiante. Par contre, lorsqu'on se dirige vers Moyeuvre en venant de Rosselange, elle augmente rapidement, en même temps que la faille s'accentue. Les coupes aux points XS, XT, XU, aux niveaux 200, 180 et 160 de la mine de Moyeuvre et de Gross-Moyeuvre, sont caractérisées par les conditions suivantes. La couche noire est à peu près constante d'épaisseur (2 mètres), ainsi que les marnes qui la séparent de la grise (6 mètres), puis les couches grise, jaune et rouge présentent les épaisseurs croissantes indiquées ci-dessous :

Grise.....	$2^m,00$-$2^m,50$ et $4^m,00$
Jaune.....	$1^m,90$-$2^m,00$ et $2^m,15$
Rouge.....	$0^m,70$-$1^m,20$ et $2^m,80$

La qualité de la couche est également très différente entre les deux points extrêmes. En XS, elle est pauvre et siliceuse avec 20 à 25 p. 100 de silice, tandis qu'en XU elle est calcaire avec 39 p. 100 de fer. La mine de Rosselange, à l'Est de la courbe 200, ne trouve plus de couche grise à exploiter. Elle est obligée de se rabattre sur la brune à 26 p. 100 de fer environ, avec prédominance de l'élément siliceux.

Une recherche faite au Justemont en XX n'a trouvé que 1 mètre de couche inférieure inexploitable (oolithes grossières, toujours caractéristiques d'une couche pauvre).

Digitized by Google

En XY, sur les affleurements de la mine d'Hayange, une recherche a donné des résultats comparables, de tous points, à celle du Justemont.

Par contre, au point XV, cote 200, non loin de la faille de Neufchef, voici la coupe qu'on trouve :

COUPE AU POINT (XV).

DÉSIGNATION DES COUCHES	ÉPAISSEUR	ANALYSES MOYENNES		
		Fer	Chaux	Silice
Calcaire ferrugineux (moitié calcaire, moitié minerai pauvre)..	1m,30	20	28	12
Marnes brunes.....	4 ,00	»	»	»
Couche rouge.....	1 ,30	22	22	10
Marnes alternant avec des bancs de calcaire ferrugineux	4 ,00	»	»	»
Couche jaune	0 ,80	25	22	10
Calcaire marneux et ferrugineux..	1 ,30	»	»	»
Couche grise avec rognons calcaires (altitude du mur : 200m)	*5 ,00*	*34*	*9*	*7*
Marnes bleues	6 ,00	»	»	»
Couche noire marneuse, mélangée avec du calcaire gris verdâtre..	1 ,10	18	22	25

§ 5. — Région d'Avril-Briey.

En revenant de XV vers l'Ouest, on ne possède pas d'autre indication sur la couche que celle qui est fournie par le sondage P d'Avril. Étant donné l'aplatissement de la couche dans tout l'intervalle, il y a lieu de supposer que le minerai y est réparti d'une façon régulière et qu'on n'a pas de surprises à redouter dans l'exploitation de cette région.

Le sondage P, qui a donné 3m,08 de couche grise, dont 2m,20 avec : fer, 43; chaux, 6; silice, 10, est meilleur que le sondage Q, qui ne donne guère plus de 30 de fer avec 2m,84 d'épaisseur.

Aux points R, FL, U, FO, les résultats trouvés sont excellents; ils indiquent une couche de 2m,50 à 3m,50 avec 37 à 39 p. 100 de fer.

Digitized by Google

Mêmes résultats aux points V, FN et W, où la couche a de 3m,50 à 4 mètres.

Il résulte de cette uniformité de répartition qu'il est difficile d'apprécier le rôle des trois failles d'Avril, du Woigot et de l'Orne, dans la constitution de la couche grise du plateau considéré. On peut dire toutefois que, sans la faille d'Avril, il est probable que la région septentrionale serait appauvrie relativement à celle qui est voisine de la faille de l'Orne. Nous allons voir que, sur le versant Sud du synclinal, dont cette dernière constitue le thalweg, la couche diminue et disparaît peu à peu, faute de faille nourricière (Voir à la Pl. X les coupes P et BN, de part et d'autre de la faille d'Avril, qui montrent des différences sensibles dans la composition de la formation ferrugineuse. Couches noires bien développées en P, qui démontrent que le rejet de la faille vers le Nord est postérieur à la formation de ces couches).

§ 6. — Région méridionale du bassin.

Sur le flanc Sud du synclinal, on constate, en effet, que la limite d'exploitabilité de la couche grise, du côté de Montois, s'infléchit vers le Sud-Ouest.

Entre l'Orne et la faille de Rombas, c'est toujours l'horizon 200 qui limite la zone exploitable (couche grise de 1m,20 de puissance). Mais, à la rencontre de cette faille, qui a donné un relèvement de 46 mètres sur la lèvre méridionale, la pente du synclinal augmente rapidement; c'est alors l'horizon 180 d'abord, puis l'horizon 160, qui forment la limite d'exploitabilité.

Le redressement du synclinal dans cette région (Malancourt-Roncourt), en même temps que le rejet septentrional de la faille de Rombas, sont la cause de cet appau-

Digitized by Google

vrissement. C'est, en effet, sur le versant Nord de la faille de Rombas que la couche grise est la plus riche.

Ce fait se vérifie non seulement dans la mine de Montois, où l'on a remarqué qu'un enrichissement sensible existait du côté de la frontière, mais aussi dans celle de l'Orne. Tandis qu'en un point de l'horizontale 160, situé à égale distance des failles de Rombas et de Roncourt, on n'obtient qu'un produit à 33 ou 34 p. 100 de fer, 7 à 10 p. 100 de chaux et 13 à 15 p. 100 de silice, dans l'angle formé par les failles de Montois et de Rombas la couche monte à 4^{m},20 de puissance et 38 et 39 p. 100 de fer. On a remarqué qu'elle y présentait une couleur rougeâtre particulière, comme dans le voisinage de beaucoup de failles.

Plus au Nord, près des affleurements dans la vallée de l'Orne, la même couche n'a plus que 2^{m},20 et 33 à 34 p. 100 de fer.

L'influence de la faille de Rombas sur la partie abaissée est donc manifeste.

Nous verrons plus loin que la même faille a donné naissance à une couche jaune, qui est exploitée de part et d'autre de sa direction, sur une certaine largeur, au-delà de laquelle la couche s'appauvrit et ne peut plus être utilisée.

Si l'on examine maintenant ce qui se passe à l'Ouest de la faille de Montois, dans le quadrilatère effondré de Jœuf-Auboué, on constate que la couche grise est à peu près uniformément représentée par 3^{m},50 à 4 mètres de minerai de très bonne qualité (Voir la coupe VIII). Nous sommes certainement là dans une région de première zone, ce terme étant entendu comme nous l'avons défini en étudiant le bassin de Landres.

Digitized by Google

§ 7. — Région occidentale.

Le reste du bassin de l'Orne, c'est-à-dire la partie qui se développe depuis les failles du Woigot et de Sainte-Marie jusqu'au terminus de Brainville, est suffisamment expliqué par les coupes VIII, IX et X (Pl. XII).

Elles mettent bien en évidence l'augmentation de richesse de la partie centrale. A cet égard, le sondage AN de Jarny (Voir Pl. X, coupes de AN et AM) est des plus caractéristiques. La coupe VIII et les courbes de niveau de la Pl. V font ressortir sa position privilégiée à l'entrée du synclinal de Brainville, au bas d'une pente assez prononcée.

Au sondage du Porcher, AT, la couche est encore très bonne, puis elle se termine en biseau et cesse d'être exploitable un peu avant d'atteindre la limite du département de la Meuse, ainsi que l'a démontré une recherche FD, exécutée en 1899, et poussée jusqu'à plus de 300 mètres de profondeur. Le sondage n'a traversé qu'une couche pauvre de $0^m,53$, à la profondeur de 277 mètres et à l'altitude — 71.

Les coupes transversales IX et X montrent comment le bassin de l'Orne se termine au Sud. Vers la frontière, le relèvement continu du flanc du synclinal coïncide avec une diminution progressive de la formation ferrugineuse.

Dans les sondages DR et DU de Saint-Marcel, situés entre ces deux coupes, on n'a trouvé que des couches contenant moins de 30 p. 100 de fer et plus de 20 p. 100 de silice.

§ 8. — Région de Génaville.

La terminaison septentrionale du bassin, aux environs de Génaville, présente une particularité intéressante à

Digitized by Google

signaler. Alors que les sondages AB, DS et EV d'Hatrize sont médiocres, et caractérisent une région de deuxième zone, savoir:

Sondages.	Epaisseur.	Fer.	Chaux.	Silice.
AB	3m,81	29	20	15
DS	2 ,63	33	14	12
EV	2 ,30	27	21	8

ceux de Génaville, S, EA, EX, sont bons, savoir :

Sondages.	Epaisseur.	Fer.	Chaux.	Silice.
S	2m,40	37	11	9
EA	4 ,07	36	11	11
EX	2 ,75	37	11	8

Ces derniers résultats s'expliquent par l'existence d'une émission ferrugineuse sur la faille du Woigot, aux environs de Briey, et dont le sondage T (Mussot) (2m,55 : fer, 39 ; chaux, 9 ; silice, 8) dépendrait directement. La forme synclinale de la courbe 20, auprès des sondages EA et EX, s'accorde avec cet enrichissement local.

Il serait facile de diviser la région minéralisée que nous venons d'étudier en trois zones, analogues à celles que nous avons définies en analysant la constitution du bassin de Landres ; mais, en raison de quelques indécisions qui peuvent subsister dans les résultats donnés par les sondages, dont la plupart ont déjà vingt ans d'ancienneté, nous préférons ne pas trop préciser la question.

Bornons-nous à faire remarquer que la deuxième zône, mise en évidence par les sondages AB, DS et EV, confine à des minerais de première zone dérivant, d'une part, de la faille du Woigot ; d'autre part, de celle de l'Orne. Ces derniers, situés dans la région de Moineville-Giraumont, forment même une première région de première zone, comme celle que nous avons délimitée, entre la faille de Bonvillers et Joudreville, dans le bassin de Landres. Rappelons à ce propos que, dans la forma-

Digitized by Google

tion traversée par le sondage AG, on a trouvé des échantillons de minerais à 48 p. 100 de fer et à teneur élevée en manganèse.

DEUXIÈME SECTION.

Couches accessoires.

Il nous reste à examiner la répartition des couches inférieures et supérieures dans le bassin de l'Orne.

§ 1. — Couches inférieures.

Nous emploierons souvent le terme de couche noire pour désigner ce faisceau.

Nous avons déjà dit que c'est la seule ressource des mines du bassin méridional, où la couche noire était exploitée à Ars, antérieurement à 1870.

On l'a exploré aussi et exploité plus ou moins, dans ces derniers temps, à Marange, Pierrevillers, et enfin à Rombas.

En ce qui concerne le bassin de l'Orne proprement dit, voici ce qu'on sait sur l'existence des couches inférieures.

La couche brune se trouve souvent au mur même de la couche grise, où elle constitue un banc siliceux d'une puissance de $0^m,50$ à $1^m,50$.

Il ne semble pas qu'on puisse l'utiliser en aucun point du bassin de l'Orne.

On doit cependant prévoir le cas où les maîtres de forges, ayant besoin d'un fondant siliceux, pourraient être amenés à l'exploiter accidentellement avec la grise (c'est une raison de ce genre qui a motivé l'exploitation pen-

Digitized by Google

dant quelque temps de la couche noire, à Jœuf, par MM. de Wendel).

Dans la mine de Moyeuvre, elle est de qualité médiocre ; mais elle s'améliore, à l'Ouest de la frontière.

C'est ainsi que la mine Orne peut en tirer parti dans la région occidentale près de Jœuf.

Elle a été signalée dans la région comprise entre Sainte-Marie et Auboué (sondages XM et XL, Prinz August II et III). A la mine de Sainte-Marie-aux-Chênes, elle serait exploitable, tandis qu'à celle d'Auboué elle ne vaut rien.

En conséquence, elle doit être délimitée par un périmètre tel que celui qui figure sur la Pl. V. La lentille exploitable aurait pour centre le point d'intersection des deux failles de Rombas et de Sainte-Marie.

En examinant les résultats des sondages du plateau compris entre les failles d'Avril, du Woigot et de l'Orne, on trouve que les couches inférieures y sont assez convenablement représentées, savoir :

PUITS OU SONDAGES	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
W (Jœuf)	0,90	33	7	24
FP (Fond de la Noue)	1,20	35	7	17
V —	1,00	35	7	20
	2,26 (verte)	32	13	9
FO (Moutiers)	1,75	31	5	27
	2,05 (verte)	32	14	9
U (Moutiers)	0,72	»	»	»
	3,60 (verte)	»	»	»
FL (Moutiers)	1,72	32	4	29
	4,43 (verte)	30	19	19
R (La Chénois)	1,90	»	»	»
	2,71 (verte)	»	»	»
P (Avril)	2,85	35	5	25
	1,70	30	11	22
Q (Bois des Moines)	3,11	33	5	23
	1,64	34	7	16

En dehors de ce plateau, les couches inférieures règnent encore dans la partie centrale du bassin, mais elles disparaissent assez vite vers l'Ouest et le Sud.

Ainsi, au sondage AN de Jarny, que nous avons déjà eu occasion de citer et qui a été fait avec un très grand

Digitized by Google

soin par la Société Schneider et Cie du Creusot, elles sont notées, la couche noire avec 0m,59 d'épaisseur, très pauvre, et la couche verte avec 1m,29 et la mention : « calcaire ferrugineux marneux très pauvre » ; mais, au centre, on trouve en AB, AH, des résultats très intéressants ;

En AB, la couche a 4m,21 avec 34 de fer, 8 de chaux, 6 de silice ;

En AH, elle a 2m,75 et une analyse donne : fer, 40 ; chaux, 9 ; silice, 11.

Ces résultats, qui remontent à 1883, ont été confirmés par des recherches plus récentes, dont nous avons examiné nous-même les carottes. Ainsi le sondage DS a donné une couche de 3m,65 avec 36 de fer, 7 de chaux, 19 de silice.

Le sondage EA a donné un résultat analogue avec une épaisseur réduite à 2m,75.

Enfin, on retombe, avec le sondage EY, dans une région d'appauvrissement où la couche noire redevient inutilisable (Voir délimitation de la Pl. V).

On peut donc dire que, dans l'ensemble du bassin de l'Orne, la zone la plus riche de la couche noire se trouve au centre du triangle Giraumont-Moineville-Génaville. Elle dépendrait d'une émission située à l'extrémité Ouest de la faille de l'Orne. Quant à la lentille reconnue aux sondages P et Q, elle proviendrait de la faille d'Avril ; celle qui va de Briey à Jœuf serait formée par la réunion de deux dépôts, originaires l'un de la faille du Woigot, et l'autre de la faille de l'Orne (partie centrale) (Voir Pl. V).

§ 2. — Couche jaune.

Cette couche est représentée, dans beaucoup de sondages, par un banc de calcaires ferrugineux situé au toit

Digitized by Google

de la couche grise, dont il n'est séparé que par un faible intervalle de 1 mètre environ de calcaire.

La couche est bien formée, suffisamment riche et puissante pour être exploitée dans les endroits suivants.

Région de Montois. — Zone s'allongeant de Montois à Rosselange avec une largeur de 1.500 mètres environ. La faille de Rombas est à peu près dans l'axe de cette zone. La couche jaune s'y exploite avec 2m,00 à 2m,50 d'épaisseur. Composition : fer, 35 à 38; chaux, 12; silice, 7. A l'extrémité Est de la zone utile, elle descend à 1m,20 (mine de Saint-Paul).

Région d'Homécourt. — La composition de la couche dans cette région est la suivante :

	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
W (Puits de Jœuf)	2m,30	36	14	6
FP (Haut des Tapes)	2 ,50	34	14	7

Aux points X, FN, AD, FM, la couche n'est plus exploitable.

Région de Briey-Valleroy. — Elle commence à redevenir bonne en FO et FL, tandis qu'à S, T et R, elle ne vaut rien.

A Y et Z, elle est exploitable, alors qu'à AC, AB, EA, elle ne vaut plus rien. Voici les données fournies par les sondages bons.

SONDAGES	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
FO (Moutiers)	1m,45	35	16	5
FL (Moutiers).....	2 ,67	35	15	7
Y (Valleroy)	1 ,20	34	14	7
Z (Bellevue).....	3 ,66	34	16	10

Digitized by Google

Région d'Avril. — Le sondage P a donné une couche de 1m,20, dont ci-dessous une analyse :

Fer..... 40 Chaux.... 7 Silice..... 11

Au sondage Q, la couche jaune n'est plus utilisable (Voir les délimitations de la Pl. V).

§ 3. — Couche rouge.

En Lorraine allemande, la couche rouge exploitable n'a pas été signalée.

En France, on la trouve :

1° **Région de Jœuf-Homécourt.** — Aux points W, X, FN et FP, avec la composition suivante :

SONDAGES DES PUITS	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
W (Puits de Jœuf).....	2m,05	38	11	7
X (Jœuf)	2 ,53	40	6	7
FN (Haut des Tapes)	3 ,40	36	12	6
FP (Fond de la Noue).....	3 ,60	35	14	6

En V, FM, AD, la couche ne vaut plus rien.

2° **Région de Briey.** — A l'Ouest de la faille du Woigot, il n'y a rien de bon. Exemple :

SONDAGES	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
T (Mussot).....	2m,63	23	27	6
Y (Valleroy).....	2 ,75	19	24	15
Z (Bellevue).....	1 ,45	28	15	16
EA (Les Baroches).....	1 ,05	21	22	19

Tandis qu'à l'Est de la faille les sondages U, FO, FL,

Digitized by Google

R, sont très bons, ainsi que le montre le tableau ci-après :

SONDAGES	ÉPAISSEUR	FER	CHAUX	SILICE
U (Moutiers).....	2m,18	40	9	5
FO —	1 ,45	39	7	8
FL —	3 ,40	40	8	6
R (La Chénois).....	2 ,93	35	15	7

Aux sondages P et Q, il n'y a plus qu'un banc insignifiant.

Dans tout le reste du bassin de l'Orne, la couche rouge ne renferme rien d'exploitable.

Remarque. — Les résultats trouvés en couches jaune et rouge, au voisinage des failles de l'Orne et du Woigot, favorables tantôt sur une lèvre, tantôt sur l'autre, indiquent que les mouvements de terrains ne se sont pas faits toujours dans le même sens, lors des dislocations successives. C'était tantôt un côté, tantôt l'autre qui s'abaissait. Cette observation justifie la réserve que nous faisions au chapitre II (p. 152), sur le défaut de concordance possible, au voisinage des failles, entre le relief actuel des couches et celui qu'elles ont pu affecter lors des dépôts.

CHAPITRE VII.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LA COMPOSITION DES MINERAIS ET LEUR GENÈSE.

Nous avons déjà donné, à la fin du chapitre IV, des indications relatives à la composition des minerais du bassin de Landres. Nous avons montré : 1° que les couches ferrugineuses s'étaient formées par le mélange des matières minérales amenées de la profondeur par les sources, avec les sédiments pauvres contemporains, constitués aux

Digitized by Google

dépens des terrains préexistants ; 2° que, dans le voisinage des centres d'émission, la précipitation du fer a atteint son maximum et a permis la constitution d'une zone de grande richesse ; 3° que, sur la périphérie de cette première zone, il en existe une seconde où le carbonate de chaux s'est précipité à son tour en grande abondance ; 4° et qu'enfin, au-delà de la deuxième zone, s'étendent des formations sédimentaires simplement enrichies par l'élément ferrugineux devenant de moins en moins abondant.

Il sera fort intéressant, pour les exploitants de mines, de connaître ces différentes zones, dont dépend étroitement la valeur des produits.

Les première et deuxième zones contiennent les minerais riches ou calcaires, presque purs. Ce n'est que sur la bordure extérieure de la deuxième zone que le mélange avec les sédiments pauvres devient très sensible.

Au large de cette limite, suivant que les sédiments contemporains étaient quartzeux, argileux ou calcaires, les produits présentent des compositions très disparates où la silice, l'alumine ou la chaux atteignent quelquefois des teneurs considérables.

En ce qui concerne le traitement métallurgique, les minerais à teneur élevée en silice ou en chaux ne sont pas toujours à dédaigner. Grâce à la prédominance de l'un ou de l'autre de ces éléments, et aussi parfois à celle de l'alumine, leur caractère réfractaire s'accentue et ils deviennent éminemment propres à la fabrication des fontes de moulage, fabrication dans laquelle il faut réaliser une allure très chaude pour parvenir à introduire beaucoup de silicium dans la fonte.

En dehors de ce cas spécial, la présence de la silice à l'état de quartz dans les minerais est plutôt un inconvénient, et on cherche à l'éviter autant que possible, surtout depuis que le procédé Thomas s'est répandu dans l'Est.

Digitized by Google

§ 1. — SILICE ET ALUMINE CONTENUES DANS LES MINERAIS.

Dans les très nombreuses analyses qui ont été faites dans ces dernières années, à l'occasion des recherches de mines, on ne s'est jamais préoccupé de doser séparément la silice combinée et le quartz. D'une façon générale, on sait que les minerais très quartzeux présentent une grande friabilité. Ceux où prédomine le calcaire sont, au contraire, extrêmement résistants.

Des échantillons de minerais de cette dernière catégorie, essayés à l'usine de la Société de Pont-à-Mousson, n'ont commencé à se fendiller que sous des pressions variant entre 217 à 288 kilogrammes par centimètre carré.

Dans les minerais purs, le ciment qui réunit les oolithes est à la fois calcaire et silicaté; le sesquioxyde de fer s'est concentré spécialement dans les oolithes, mais sans se dégager entièrement de la chlorite, qui a été en partie concrétionnée avec lui.

C'est, du moins, ce que tendent à démontrer les travaux de M. Bleicher, qui a étudié les effets d'une action prolongée de l'acide chlorhydrique et du chlorate de potasse, avec ou sans addition d'acide nitrique, sur les oolithes ferrugineuses. M. Bleicher a constaté de la sorte :

1° Que les oolithes sortent de ce traitement privées de fer et réduites à un squelette siliceux zoné ;

2° Que le ciment dans lequel les oolithes sont nichées est devenu aussi complètement privé de fer et qu'il est souvent d'une structure fibrillaire ;

3° Qu'on observe quelquefois des grains de sable quartzeux entrant dans la composition du ciment ou dans celle des oolithes.

Digitized by Google

M. Bleicher conclut ainsi : « La richesse du minerai « est en fonction directe du rapprochement des grains « oolithiques, qui sont les grands condensateurs de limo- « nite et en raison inverse de l'abondance du calcaire « sous forme de débris de coquilles et de l'abondance du « ciment, quelle que soit sa nature. »

Théorie de la genèse par substitution. — Le squelette siliceux zoné que signale M. Bleicher serait le résidu de la destruction de l'oxyde de fer libre et de celui qui existait en combinaison avec la silice dans les oolithes.

Des recherches récentes de M. Stanislas Meunier l'ont amené à des conclusions notablement différentes. Le résidu obtenu par l'action prolongée de l'acide chlorhydrique sur les oolithes serait non pas de la silice, mais un mélange de sable et d'un hydrate d'alumine, constituant une variété de bauxite. M. Stanislas Meunier part de cette constatation pour conclure à la formation des minerais par une épigénie progressive de dépôts précédemment calcaires, sous l'action prolongée d'eaux chargées de sels solubles de fer et d'alumine.

A l'appui de cette théorie, M. Stanislas Meunier cite les proportions anormales d'alumine qui ont été trouvées dans certains minerais (13 p. 100 pour des mines de la région de Nancy).

L'indication d'une teneur en alumine aussi élevée est loin de correspondre à la généralité des cas; dans la pratique courante, elle ne se rencontre que très rarement, pour ne pas dire jamais. Même dans ceux des minerais de la région de Nancy qui passent pour être assez alumineux, elle ne s'écarte guère du chiffre de 7 à 9 p. 100. Témoin les analyses ci-dessous de trois mines différentes du bassin de Nancy.

Digitized by Google

MINES DE	PERTE AU FEU	FER	CHAUX	SILICE	ALUMINE
Boudonville	15,10	35,50	5,00	17,08	7,05
Val-de-Fer	15,62	35,97	8,90	14,60	8,25
Amance.....	18,97	33,22	12,05	9,70	8,78

Les minerais de la concession de Frouard utilisés par les forges situées dans la même localité ont la composition suivante :

Fer.. 36; Chaux.. 7; Silice.. 13 à 14; Alumine.. 8 à 8,50.

En remontant aussi loin que possible dans les recherches relatives à l'obtention de cette concession, les exploitants n'ont pu nous citer qu'un seul cas où la teneur en alumine ait été trouvée supérieure à 10 p. 100. Il s'agit d'un petit banc de 0m,10 de la couche inférieure (qu'on n'exploite d'ailleurs en aucune façon) qui aurait fourni, à l'analyse, alumine : 11,50 p. 100.

Les exploitants de la mine de Chavigny sont également convaincus que des teneurs en alumine aussi élevées que celles dont il vient d'être fait mention ne peuvent se rencontrer que dans des couches de mauvaise qualité et inutilisables.

C'est encore dans la couche inférieure, très marneuse, qu'on a trouvé le maximum d'alumine, 10,77 p. 100.

(Il est d'ailleurs prudent de ne pas trop se fier aux dosages d'alumine, qui se font, comme on sait, par différence, dans la plupart des laboratoires.)

On peut voir, par les analyses détaillées reproduites ci-dessous, que les teneurs en alumine des minerais de Landres qui peuvent être considérés comme types d'excellents produits restent comprises dans des limites bien plus faibles.

Digitized by Google

SONDAGES	FER	CHAUX	SILICE	ALUMINE
CE	41,94	9,23	5,38	5,94
CH	41,43	12,02	6,02	5,29
CQ	33,62	15,02	7,78	5,67

SONDAGES	FER	CHAUX	SILICE	ALUMINE
CS	38,08	15,40	5,83	5,32
CT	37,33	12,42	5,82	5,14
DA	32,96	14,93	6,33	6,03
DB	31,80	18,32	6,12	4,29
DG	40,21	10,66	5,66	5,03
DH	39,78	12,67	5,60	4,61
DP	35,93	13,97	7,03	4,44

Dans le sondage DG, la couche grise se compose de bancs de mine riche et de bancs calcaires. Leur analyse séparée a donné les résultats suivants :

1° Minerai riche à fines oolithes (partie supérieure de la couche) :

Fer... 40,18; Chaux.. 10,78; Silice.. 4,76; Alumine.. 5,37

2° Minerai calcaire à grosses oolithes (partie médiane de la couche) :

Fer... 31,69; Chaux.. 19,14; Silice.. 6,54; Alumine.. 3,57

3° Minerai calcaire à fines oolithes (partie inférieure de la couche) :

Fer.. 27,30; Chaux.. 20,87; Silice.. 7,54; Alumine.. 4,22

Il semble qu'on puisse conclure de là que, dans les minerais purs de première zone, l'alumine est représentée d'une façon à peu près constante par une proportion variant de 4 à 6 p. 100 (*).

(*) En se reportant à l'analyse du banc de richesse exceptionnelle rencontré au sondage DH de Joudreville (p. 196), le lecteur s'assurera facilement que l'alumine ne s'y rencontre que dans une proportion comprise dans les mêmes limites.

Digitized by Google

Dans les minerais moins purs, c'est-à-dire mélangés d'une quantité plus ou moins considérable de sédiments argilo-calcaires, la proportion s'élève un peu pour rester comprise entre 7 et 9 p. 100. En particulier, aucune des analyses publiées au sujet des couches du Luxembourg n'indique de proportions supérieures à cette teneur.

M. Bleicher avait formulé autrefois une théorie qui reposait sur le pouvoir fixateur de la silice et de l'alumine en présence du fer.

M. Bleicher résumait comme suit les principes de cette théorie.

Les conditions favorables à la formation du minerai oolithique sont : la présence simultanée, en un point : 1° de fer dissous ou à l'état de suspension ; 2° de silice et d'alumine. C'est par le jeu combiné de ces trois éléments, que l'eau de mer pouvait contenir en proportion variable, que le dépôt a pu s'effectuer. Il est possible que les choses se soient passées ainsi : sur certaines surfaces des fonds de mer en forme de cuvettes peu profondes, se sont accumulées des vases fortement siliceuses et un peu alumineuses qui ont *fixé*, au fur et à mesure, le fer des eaux qui passaient au-dessus ou au milieu d'elles. Il n'est pas nécessaire d'admettre que la proportion de fer entraînée par les eaux soit très considérable ; elle devait cependant l'être plus que dans les eaux de mer normales, mais pas assez forte pour gêner la vie animale.

L'alumine et la silice à l'état gélatineux fixent très bien, l'alumine surtout, le fer des solutions ferrugineuses et les éclaircissent rapidement par précipitation de l'oxyde de fer.

La silice et l'alumiue auraient peu à peu englobé dans un réseau tout le « fer qui se présentait, et plus tard « seulement, dans cette sorte d'écume demi-solide, fer- « rugineuse et siliceuse, les oolithes se seraient formées « par condensation de silice, de fer, d'alumine, en couches

Digitized by Google

« concentriques autour d'un centre d'attraction, grain de « sable ou débris organiques. Les oolithes résultent, en « effet, d'une sorte de condensation, de concentration du « fer dans la masse silico-ferrugineuse (*) ».

D'après la théorie récente de M. Stanislas Meunier, le rôle fixateur de l'alumine interviendrait aussi, mais non plus à l'époque même où se déposaient les couches ; ce serait postérieurement, par métasomatose lente, que des formations, primitivement calcaires, se seraient transformées en limonite.

La théorie métasomatique, qui est très en honneur en Allemagne, repose sur des observations qui sont sans doute fondées, et qui peuvent donner dans différents cas particuliers la clef de certains phénomènes. Dans le cas spécial des minerais de la Lorraine, elle fournit l'explication de la ferruginisation de fragments de roches primitivement stériles et de restes fossiles d'origine animale ou végétale. Mais il ne nous paraît pas possible de la mettre en cause pour expliquer la formation des couches oolithiques elles-mêmes.

Etant donné le rôle protecteur que joue, par rapport à la formation ferrugineuse, au point de vue de la pénétration des eaux, la puissante assise des marnes micacées qui la recouvrent, il faudrait admettre, pour justifier la genèse des minerais par métasomatose, que les eaux ferruginisantes sont descendues de la surface par des cassures ou failles interrompant la continuité du banc imperméable.

Les failles que nous qualifions de nourricières auraient fourni, en particulier, des voies de pénétrations de ce genre. Le fer qu'elles auraient véhiculé leur aurait été fourni par la destruction des assises de l'oolithe moyenne,

---

(*) *Le Minerai de fer de Meurthe-et-Moselle*, par M. Bleicher (*Bulletin de la Société industrielle de l'Est*, 1894).

Digitized by Google

l'oxfordien notamment, peut-être aussi le corallien, qui recouvraient autrefois le gisement.

Dès le principe, on est arrêté par l'immense quantité de terrain détruit qu'il faudrait admettre pour engendrer l'énorme masse de fer rassemblée aujourd'hui dans l'étage toarcien.

Mais une autre objection est plus grave. Si la minéralisation s'était faite *per descensum*, elle aurait surtout porté sur les calcaires du bajocien inférieur, puisque les eaux d'infiltration s'y rassemblent fatalement au-dessus des marnes micacées. De fait, les calcaires de l'infra-bajocien sont très ocreux, et quelques explorateurs inexpérimentés les ont quelquefois confondus avec des horizons du minerai de fer.

En admettant même que la minéralisation ait dû se localiser, pour une raison ou pour une autre, dans le toarcien, comment expliquer que certains horizons superposés soient seuls riches en fer, tandis que d'autres, de nature calcaire cependant, n'aient pas été ferruginisés? que, dans une même couche, on rencontre des bancs calcaires pauvres à côté d'autres constitués presque uniquement d'oolithes riches?

En particulier, il est frappant de trouver, au toit de la couche grise, dans une notable portion du gisement, — dans le bassin de Landres, surtout, — un banc de calcaire blanchâtre grossier, lumachellique très souvent, extrêmement pauvre en fer.

Ce banc, qui a fréquemment de $0^m,40$ à $0^m,50$ d'épaisseur et se trouve régulièrement superposé à la couche grise, montre une accumulation de coquillages qui fait un contraste frappant avec la couche, complètement dépourvue de fossiles.

Dans le voisinage des points d'émergence de l'élément ferrugineux, on remarque, en effet, que non seulement les produits ont une couleur et une texture spé-

Digitized by Google

ciales, mais encore qu'ils sont entièrement privés de restes organiques, tandis que ceux-ci apparaissent très nombreux au toit de la couche ; les êtres vivants ne pouvaient sans doute revenir habiter les eaux de la mer que lorsqu'elles avaient repris leur régime normal.

Dans les couches riches, c'est donc loin des émergences que se trouvent les fossiles, et bien souvent les apports de la sédimentation s'y reconnaissent par des placages de marne mélangés au minerai. D'une façon générale, on peut dire que, lorsqu'une couche est très fossilifère, elle annonce l'approche de la zone pauvre, celle que nous avons appelée la troisième zone, où la sédimentation ordinaire l'emporte sur le flux ferrugineux.

En résumé, les minerais les plus riches ne correspondent nullement à des teneurs en alumine élevées, et il n'est pas rare de trouver des minerais à 40 p. 100 de fer n'ayant que 5 p. 100 d'alumine.

§ 2. — Carbonates contenus dans le minerai.

La remise en circulation du fer s'est faite fréquemment grâce à l'action dissolvante de l'acide carbonique, soit que celui-ci ait été amené par les eaux météoriques, soit qu'il ait été produit par des décompositions organiques.

On trouve, dans des horizons pauvres de la formation ferrugineuse de Lorraine, notamment dans des bancs de calcaires coquilliers, d'assez gros grains de limonite qui n'ont pas d'autre origine. Cette reprise par l'acide carbonique produit un enrichissement et une purification du minerai corrélatif de l'élimination partielle de la silice, de la chaux et de l'acide phosphorique. C'est pourquoi les minerais formés au détriment des couches toarciennes, par des redissolutions successives, sont de plus en plus purs.

Digitized by Google

Le minerai de fer fort, qu'on trouve superposé dans les dépôts diluviens de la Lorraine, au-dessus du gisement toarcien, provient très probablement de la destruction d'assises éocènes ferrugineuses, qui n'auraient dû elles-mêmes leur fer qu'à des reprises exercées sur les affleurements des couches toarciennes.

Les dépôts de minerais de l'oxfordien et ceux des sables verts, qu'on a exploités autrefois dans les départements de la Meuse et des Ardennes, devaient avoir une origine analogue à celle de ces formations tertiaires disparues.

Il s'est formé aussi à leurs dépens, dans les Ardennes, des minerais d'âge récent que l'on recherchait beaucoup autrefois à cause de leur pureté.

On les trouvait généralement dans des crevasses du terrain jurassique, et leur structure bacillaire leur avait fait donner communément le nom de « minerais à clous »; chaque baguette était formée de couches concentriques, et très souvent l'axe offrait un vide semblable à celui qui résulterait d'une épingle fine insinuée dans la masse. C'était, en somme, une formation de stalactite, dans laquelle, au lieu de carbonate de chaux, il s'agissait de carbonate de fer.

La formation des stalactites de limonite suppose un apport continu et très faible de carbonate de fer, se transformant, au fur et à mesure de son arrivée, en oxyde. En opposition avec ces conditions, on peut concevoir, d'une part, que l'apport ferrugineux ait été abondant et, d'autre part, que le milieu où se faisait le dépôt n'ait pas été favorable aux actions d'oxydation; dans ce cas, on ne devrait pas être surpris de rencontrer des amas de carbonate de fer.

S'il existe de tels amas dans les gisements de la Lorraine, ils doivent être extrêmement rares, car les auteurs n'en ont pas signalé jusqu'ici. Ils ne pourraient

Digitized by Google

se trouver que dans des fentes ou des cavités dans lesquelles des eaux carbonatées seraient venues les déposer, sans les exposer aux agents d'oxydation.

C'est d'une façon analogue que se seraient formés des amas de pyrite de fer qu'on a découverts en quelques points du gisement lorrain. Dans ce cas, ce ne serait plus l'acide carbonique qui aurait été l'agent de reprise, mais l'acide sulfurique. Ce dernier dériverait directement de l'altération des pyrites contenues dans la partie inférieure de la formation (couche verte notamment).

La présence de ces pyrites constitue un caractère constant de la base de la formation, à tel point que les recherches dirigées avec soin n'ont jamais été considérées comme ayant atteint leur but que lorsqu'elles pénétraient dans cet horizon pyriteux.

Le dépôt de ces minerais mélangés de pyrite n'a pu se faire que dans un milieu où il y avait lutte entre les actions oxydantes et les actions réductrices. Il n'y aurait rien d'étonnant *a priori* qu'il ait pu subsister, dans ces conditions, du carbonate non décomposé dans les couches à la fois les plus anciennes et les plus pyriteuses.

Des recherches toutes récentes effectuées par M. Blum, d'Esch-sur-Alzette (*Stahl und Eisen*, 1901, n° 23), ont démontré qu'il en est bien ainsi. Les principaux résultats trouvés par M. Blum peuvent se résumer comme suit :

La proportion de protoxyde de fer dans les minerais croît avec l'ancienneté de la couche. Dans des minerais provenant de la minière de Hœhl (Luxembourg), la proportion du protoxyde de fer pour cent de minerai croît ainsi qu'il suit :

Dans la couche	rouge.....	0,93	p. 100
—	grise	1,01	—
—	brune	8,06	—
—	noire	14,38	—

Digitized by Google

En dosant spécialement l'acide carbonique et le protoxyde de fer dans les trois minerais dont les analyses sont reproduites ci-après, M. Blum arrive, en combinant de la façon qui lui paraît la plus vraisemblable les acides et les bases en présence, à conclure que le carbonate de fer figure dans la proportion de 15,35 p. 100, de 26,99 p. 100 et de 60,23 p. 100 respectivement dans les échantillons *a*, *b*, *c*, savoir :

a Mine noire d'Algrange.
b — de Differdange.
c — de la mine Friede.

	a	*b*	*c*
Silice	7,39	14,02	6,98
Peroxyde de fer	31,29	4,93	10,31
Protoxyde de fer	33,54	34,27	37,36
Alumine	4,80	5,13	3,77
Chaux	6,04	6,86	4,08
Magnésie	1,22	2,83	2,16
Oxyde de manganèse	0,46	0,74	0,79
Acide phosphorique	1,88	1,72	1,95
Acide carbonique	10,22	18,75	26,69
Soufre	»	1,73	»

Déjà, en 1828, Berthier signalait, dans les *Annales des Mines*, la présence du carbonate de fer dans le minerai d'une couche inférieure d'Hayange.

M. Blum a conclu de ses recherches que le fer du gisement lorrain provenait d'une série de décompositions dont les pyrites des schistes à posidonies du lias supérieur seraient le point de départ. C'est une variante de la théorie du charriage, dont plusieurs auteurs restent partisans. Nous avons montré qu'elle ne permettait pas d'expliquer la pauvreté du gisement aux affleurements, ni la dissémination, en des points plus ou moins éloignés du littoral, de lentilles riches placées à proximité des failles. Nous ne pouvons donc pas suivre M. Blum dans toutes les conséquences qu'il tire de ses analyses, mais il n'en

Digitized by Google

faut pas moins lui savoir grand gré d'avoir procédé à des dosages d'acide carbonique sur les minerais. Les maîtres de forges ont trop négligé jusqu'à ce jour de doser cet élément; ils se contentaient d'évaluer en bloc la perte au feu, ce qui est beaucoup trop sommaire.

Il reste d'ailleurs beaucoup de problèmes intéressants à résoudre pour un chimiste qui voudrait étudier en détail la composition intime des minerais oolithiques.

Dans le chapitre suivant, nous ne faisons qu'esquisser la solution d'une des questions qui pourraient rentrer dans une étude de ce genre, savoir : la nature des phosphates contenus dans le minerai de la Lorraine.

CHAPITRE VIII.

LE PHOSPHORE DANS LES MINERAIS OOLITHIQUES DE LORRAINE.

On a cru longtemps que le phosphore des minerais oolithiques de la Lorraine avait une origine organique, et qu'il provenait principalement des fossiles contenus dans les couches. Cette opinion ne peut plus se soutenir aujourd'hui, en présence des nombreuses analyses décelant le phosphore dans des échantillons absolument dépourvus de fossiles.

D'une façon générale, on peut dire que le phosphore est représenté dans les minerais oolithiques passés aux hauts-fourneaux par une teneur sensiblement constante.

Un lit de fusion, composé à 30 p. 100 de fer, contient 2 unités de phosphore environ p. 100 de fer, et comme, dans la fonte Thomas, le fer n'est représenté que par la proportion de 90 p. 100 approximativement, le phosphore

Digitized by Google

contenu dans les fontes de Lorraine ne s'élève lui-même qu'à 1,80 p. 100.

Cette proportion est, d'ailleurs, convenable pour l'affinage en première fusion au convertisseur basique. Quand on opère en seconde fusion, on cherche à forcer la dose de phosphore, pour compenser la légère perte que donne le passage au cubilot et surtout pour produire un dégagement de chaleur plus intense lors du sursoufflage. On y parvient en introduisant dans le haut-fourneau soit des castines phosphatées, soit des scories de puddlage phosphoreuses ou de fours Martin basiques, soit enfin des déchets de moutures de scories de déphosphoration.

On arrive ainsi à produire des fontes à 2,2 p. 100 de phosphore.

La dissémination régulière du phosphore dans les minerais oolithiques est certainement une des raisons du succès qu'ils ont obtenu dans la métallurgie de l'acier. Il fait vraiment partie de leur constitution même; aussi son dosage dans les lits de fusion n'est-il jamais nécessaire; il est le corollaire obligé de la teneur en fer.

Dans les minerais de Suède, ceux de Kiirunavaara, par exemple, il n'en est pas de même ; le phosphore s'y trouve distribué d'une façon parasitaire, à l'état d'apatite, en proportion très variable.

On est obligé, dans l'exploitation, de faire des triages assez délicats pour composer des produits à teneurs en phosphore limitées.

C'est ainsi qu'on livre aux hauts-fourneaux des produits:

1° Très peu phosphoreux à 70 p. 100 de fer et 0,01 à 0,03 de phosphore;

2° Moyennement phosphoreux à 68 p. 100 de fer et 0,05 à 1 p. 100 de Ph;

3° Très phosphoreux à 67 p. 100 de fer et 1 à 2,5 p. 100 de Ph;

Digitized by Google

4° Extrêmement phosphoreux, depuis 2,5 jusqu'à 6 p. 100 de Ph.

On conçoit que l'emploi de ces produits à teneur très variable soit de nature à donner des fontes moins régulières que celles de Lorraine, où le chimiste du haut-fourneau peut se désintéresser complètement du dosage du phosphore.

Les minerais oolithiques contiennent ce métalloïde à la fois sous forme de phosphate de chaux et de phosphate de fer. En valeur absolue, la quantité de phosphore contenue dans un minerai varie comme sa teneur en fer, ce qui suppose nécessairement qu'il existe une combinaison de l'acide phosphorique avec le fer.

Si l'on considère, par contre, un minerai très pauvre et très calcaire, il entre dans le lit de fusion une quantité considérable de phosphate de chaux qui s'ajoute au phosphate de fer. Le rapport du phosphore à 100 de fer n'est plus 2, comme nous le disions tout à l'heure lorsqu'il s'agissait d'un lit de fusion à 30 p. 100 de fer, mais un nombre plus élevé.

Le tableau suivant, dans lequel la teneur du phosphore, rapportée à 100 de fer, est mise en évidence, montre, en effet, que l'on obtient les rapports les plus élevés, 3 et 4 p. 100, pour des minerais à 18 et 16 de fer; et les plus faibles, soit 1,9 p. 100, pour les produits riches à 41 p. 100.

Digitized by Google

MINERAIS DU LUXEMBOURG.

	CaO	FER	PHOSPHORE	RAPPORT du phosphore à 100 de fer
1° *Bassin de Rumelange-Dudelange*				
Couche grise	16,34	33,24	0,80	2,4
Couche jaune	15,60	36,03	0,85	2,3
Couche rouge triée	7,68	40,67	0,99	2,4
Rognons de mine rouge	36,04	16,13	0,58	4,4
Couche siliceuse	4,93	27,63	0,72	2,5
2° *Bassin d'Esch*				
Couche noire	6,44	39,49	1,00	2,5
Couche brune	4,10	41,06	0,88	2,1
Couche grise	18,05	30,84	0,67	2,1
Couche rouge triée	7,40	40,98	0,77	1,9
Rognons de mine rouge	23,85	22,88	0,67	2,9
Couche siliceuse	4,93	27,63	0,72	2,6
3° *Bassin de Differdange*				
Couche noire	5,30	39,20	0,81	2,1
Couche grise	5,20	40,10	0,83	2,1
Couche rouge	6,94	37,71	0,80	2,1
Couche calcareuse — mine fine	6,32	41,40	0,79	1,9
Couche calcareuse — calcaire	33,32	18,17	0,53	3,0

Les minerais du bassin de Landres conduisent aux mêmes conclusions. Exemple : les sondages DG et CE, dont les résultats sont condensés ci-après.

Digitized by Google

SONDAGE DE LANDRES (DG).

CALCAIRE COQUILLIER toit de la couche grise hauteur 0m,50	CAROTTES — 32	CHAUX — 35,38	FER — 17,16	PHOSPHORE — 0,60	RAPPORT du phosphore à 100 de fer 3,5
Couche grise de la profondeur 211m.05 à 217m,70... ou de la cote 114m.80 à 104m.56..... Épaisseur : 6m.65.....	33	16,36	36,12	0,70	1,95
	34	9,17	41,98	0,89	2,12
	35	9,20	42,68	0,73	1,70
	36	6,48	46,04	0,81	1,76
	37	6,51	45,12	0,65	1,44
	38	9,55	40,93	0,89	2,18
	39	8,92	41,29	0,82	2,00
	40	10,78	38,04	0,78	2,05
	41	17,45	30,97	0,76	2,45
MOYENNE.....		10,66	40,21	0,78	1,95

	CHAUX	FER	PHOSPHORE	RAPPORT du phosphore à 100 de fer
Couche brune 2 mètres				
MOYENNE.....	6,84	24,21	0,67	2,80

SONDAGE DE PIENNE (CE).

	CHAUX	FER	PHOSPHORE	RAPPORT du phosphore à 100 de fer
Couche rouge				
Carottes 17 et 18.....	20,29	23,75	0,61	2,53

	CAROTTES	CHAUX	FER	PHOSPHORE	RAPPORT du phosphore à 100 de fer
Couche grise de la profondeur..... 207,27 à 212,95..... ou bien de la cote 92,13 à 86,45..... Epaisseur : 5m.68.....	31	5,18	45,15	0,95	2,12
	32	9,56	42,39	1 »	2,38
	33	10 »	41,71	0,97	2,30
	34	8,49	43,53	0,95	2,16
	35	6,24	45,36	0,86	1,91
	36	13,65	37,26	0,68	1,84
	37	12,44	38,34	0,81	2,13
	38	9,70	40,09	0,89	2,22
MOYENNE.....		9,23	41,94	0,89	2,12

Digitized by Google

Si on compare les résultats de ce sondage à ceux du suivant, on constate qu'en valeur absolue la quantité de phosphore contenue dans le minerai est maximum dans le plus riche, mais que, néanmoins, la proportion moyenne est très peu différente.

SONDAGE DE BOULIGNY (CQ).

	CAROTTES	CHAUX	FER	PHOSPHORE	RAPPORT du phosphore à 100 de fer
Couche grise de la profondeur.....	38	12,93	32,20	0,74	2,3
227,50 à 233,75.....	39	15,12	35.10	0,85	2,4
ou de la cote	40	13.10	37.76	0,87	2,3
54,71 à 48,46.....	42	15,41	36,05	0,75	2,1
Epaisseur : 6m,25.....	43	18,87	32,03	0,69	2,15
	44	11,14	35,58	0.78	2,05
	45	13,17	32,38	0.71	2,2
	46	14,39	33,60	0.78	2,3
	47	13,32	34.80	0.64	1,82
	48	19,03	28,47	0,60	2,15
MOYENNE.....		15,02	33,62	0,73	2,15

On arrive au même résultat si on prend, au lieu du sondage CQ, le sondage DB. L'analyse moyenne de ce dernier donne, en effet :

CHAUX	FER	PHOSPHORE	RAPPORT DU PHOSPHORE à 100 de fer
18,32	31,80	0,69	2,16

Cette constance du rapport de 2 p. 100 environ, pour les produits à teneur de 30 p. 100 et au-dessus, s'observe encore même dans un minerai de troisième zone, comme celui du sondage EB, de Bouvigny, qui a donné :

Digitized by Google

SONDAGE DE BOUVIGNY (EB).

	CAROTTES	CHAUX	FER	PHOSPHORE	RAPPORT du phosphore à 100 de fer
Couche grise de la profondeur	25	4,81	29,96	0,59	1,96
217,75 à 219,90.....	26	5,01	30,52	0,55	1,8
ou de la cote 27,21 à 25,06.....	banc de marne non analysé de 0m,15				
Epaisseur : 2m,15.....	27	7,20	14,52	0,50	3,4
MOYENNE		5,60	25,54	0,54	2,1

Enfin l'analyse d'une couche brune très pauvre, rencontrée au sondage BW, confirme ce qui a été dit précédemment au sujet de la diminution en valeur absolue du phosphore dans les minerais pauvres et de l'augmentation du pourcentage rapporté au fer :

SONDAGE D'AMERMONT (BW).

Couché brune inutilisable (située en dessous de la couche grise de 7m,21, d'excellente qualité, dont il a été question précédemment).

	CAROTTES	CHAUX	FER	PHOSPHORE	RAPPORT du phosphore à 100 de fer
De la profondeur	90	13,28	13,49	0,460	3,54
231,42 à 233,91.....	91	8,48	19,60	0,483	2,40
ou bien de la cote	92	11,08	17,83	0,366	2,05
27,19 a 24,70.....	93	14,60	15,26	0,433	2,88
Epaisseur : 2m,49	94	14,08	14,14	0,455	3,21
	95	20,68	16,10	0,433	2,70
	96	11,68	19,99	0,455	2,25

L'accumulation des coquillages dans un banc de la formation ne correspond nullement à une élévation de la teneur en phosphore. Témoin cette analyse que M. Millery, chef des laboratoires de l'usine de Jarville, a bien voulu faire sur notre demande, sur le banc coquillier formant le toit de la couche grise du sondage CS de Bonvillers.

Digitized by Google

SILICE	CHAUX	FER	PHOSPHORE	RAPPORT DU PHOSPHORE à 100 de fer
2,02	47,22	7,16	0,24	3,35

Scories de déphosphoration. — Malgré la constance de la quantité de phosphore qui passe dans les fontes de Lorraine, avec les rendements ordinaires, qui peuvent varier de 28 à 33 p. 100, il ne faudrait pas en conclure que la quantité et la richesse des scories de déphosphoration obtenues par tonne de lingot fabriqué sont constantes. Elles varient avec les autres éléments composants de la fonte et notamment avec le silicium.

La teneur minima des fontes Thomas en phosphore ne doit pas descendre en dessous de 1,70 p. 100. Si elle était plus faible, les opérations manqueraient de chaleur; d'autre part, une teneur trop élevée obligerait à des additions de chaux excessives et augmenterait le déchet dans une forte proportion.

Quant au silicium on cherche, en pratique, à le maintenir dans la proportion de 0,30 à 0,80 p. 100.

Plus il y a de silicium, moins il est nécessaire d'avoir de phosphore pour mener à bonne fin l'affinage, mais aussi plus il y a de scorie et moins celle-ci est riche en phosphore.

La composition moyenne des scories d'une aciérie de Meurthe-et-Moselle est, à titre d'exemple, la suivante :

Acide phosphorique	16,19
Chaux	47,65
Magnésie	3,75
Oxyde de fer	11,35
Oxyde de manganèse	6,46
Alumine	7,60
Silice	7,00
TOTAL	100,00

Digitized by Google

Au cours de 0 fr. 215 l'unité d'acide phosphorique total (produit moulu, en sacs, toiles perdues), la tonne de scories vaudrait donc 34 fr. 80.

Les frais de mouture, de criblage et de mise en sacs s'élevant environ à 10 francs par tonne, le maître de forges retirerait finalement un bénéfice de 25 francs par tonne de scories vendues.

A une tonne de fonte Thomas correspond, en moyenne, une production de 220 kilogrammes de scorie ; si le minerai employé donne un rendement au lit de fusion de 30 p. 100, on voit que 1.000 kilogrammes de scories exigent une consommation de $\frac{3.333}{220} \times 1.000$ de minerai, ou 15 tonnes en nombre rond.

Le bénéfice de 25 francs rapporté à la quantité de minerai consommé donne donc un produit net de 1 fr. 66 par tonne. Or, dans certains cas, le prix de revient du minerai se tient dans des limites voisines de ce chiffre. On a donc pu dire que la vente des scories suffisait parfois à payer, dans les usines lorraines, le minerai consommé.

Le Gouvernement du grand-duché de Luxembourg, depuis l'année 1898, insère, dans les actes de concession de mines, une clause telle que la suivante, destinée à procurer à l'agriculture des avantages spéciaux au point de vue de l'emploi des scories phosphatées.

CONVENTION DU 5 MAI 1898, APPROUVÉE PAR LA LOI DU 6 JUIN 1898, AU SUJET D'UNE CONCESSION MINIÈRE DE 141 HECTARES ACCORDÉE A LA SOCIÉTÉ DES HAUTS-FOURNEAUX ET FORGES DE DUDELANGE.

ART. 8. — Pendant cinquante ans à partir de l'entrée en vigueur de la présente, la Société concessionnaire mettra annuellement à la disposition de l'État 200 wagons de scories Thomas brutes de bonne qualité loyale et marchande, telles que l'aciérie les produit, prises à l'usine, à raison de 100 francs par wagon (10 tonnes) et au prix du jour, si celui-ci était inférieur à 100 francs, sans

Digitized by Google

que, dans l'un et l'autre cas, il existe une obligation pour l'État de prendre annuellement ce nombre de wagons.

A partir du 1er janvier 1908 jusqu'au 31 décembre 1947, la Société concessionnaire s'engage à fournir, en outre, annuellement, à l'État, 800 autres wagons de scories Thomas brutes de bonne qualité loyale et marchande, telles que l'aciérie les produit, au prix du jour à fixer d'un commun accord.

En cas de désaccord, le prix sera fixé dans les deux cas dont s'agit ci-dessus par trois experts, dont un à nommer par la Société, un par l'État et le troisième par le président du tribunal d'arrondissement de Luxembourg.

CHAPITRE IX.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

Un grand nombre de géologues semblent avoir, à notre époque, une répugnance très marquée à admettre les phénomènes éruptifs pour expliquer la formations des minerais de fer.

Sans doute, un très grand nombre de gisements se sont constitués par voie d'enrichissement de formation primitivement pauvres en fer.

Le mécanisme qui préside à cette transformation est très souvent celui-ci : des eaux chargées d'acide carbonique désagrègent des couches pauvres, et opèrent la séparation du fer et de la chaux. L'oxyde de fer qui résulte de la décomposition du carbonate s'accumule dans les points où cette réaction est spécialement facilitée, pendant que le carbonate de chaux est entraîné ailleurs. L'argile et la silice, au contraire, résistant aux actions de dissolution, forment un résidu qui peut s'accumuler aux mêmes points que l'oxyde de fer.

Les minerais en grains, qu'on a exploités par amas ou par poches dans un grand nombre de pays, ont dû se former par ce procédé.

Digitized by Google

On peut admettre aussi, comme M. Camusat le propose pour le gîte de Mazenay, que des variations du niveau hydrostatique d'une nappe d'eau souterraine logée dans une formation calcaire légèrement ferrugineuse, opèrent à la longue une sélection du même genre, et parviennent à constituer à un certain niveau un véritable minerai.

La genèse des minerais de fer par décalcification et par métasomatose est donc incontestable. Il en est de même de la formation par érosion et transport.

On retrouve, dans le gisement lorrain, des manifestations qui se rattachent certainement à ces divers procédés (*); mais ils n'ont dû jouer qu'un rôle accessoire et n'ont fait que se greffer, pour ainsi dire, sur le phénomène principal des émissions thermales sous-marines.

La superposition de plusieurs couches en un même point et la concentration des minerais dans des bassins distincts (bassin de Briey, bassin de Nancy, bassin de Franche-Comté), distribués sur la ligne de l'ancien rivage de la mer toarcienne, découlent aisément de la théorie geysérienne.

Les émissions sous-marines ne jouent-elles pas, d'ailleurs, de nos jours, un grand rôle dans la formation des sédiments de certains océans? Sur la plus grande partie des rivages du Pacifique, les éruptions volcaniques ne se comptent plus. On a constaté, au cours même du XIXe siècle, que certaines d'entre elles avaient amené au jour des

(*) M. Emile Picard formule en termes excellents, *in fine* de son rapport sur les sciences (Rapport du Jury international de l'Exposition de 1900. Introduction générale, 2e partie, *Sciences*, p. 113), les remarques suivantes, en manière de conclusion : « Les images par lesquelles nous cherchons à nous représenter les phénomènes du monde extérieur ne doivent jamais être regardées comme ayant un caractère définitif; de plus, elles ne sont pas nécessairement uniques ce qui peut permettre à plusieurs théories de se développer simultanément. Ce sont les théories qui constituent véritablement la science. Sans elles, il n'y a que des catalogues de faits. »

Digitized by Google

milliards de mètres cubes de produits d'origine interne.

Quelle raison empêcherait d'admettre que les sédiments toarciens ont été enrichis dans les régions métallifères de la Lorraine et de la Franche-Comté par le même procédé?

Puisant le métal dans la profondeur, à l'aplomb même des lieux de dépôts, les émissions thermales pouvaient en amener facilement des quantités très grandes sur des étendues limitées.

La théorie éruptive s'accorde très bien avec la nature sulfureuse de la couche la plus ancienne et avec la présence d'autres sulfures métalliques (blende, galène) trouvés accidentellement dans le minerai.

Elle est, par ailleurs, complètement indépendante de la position du rivage de la mer, tandis que la formation par charriage suppose un dépôt essentiellement littoral, ce qui n'est pas.

Les zones de richesse situées, par rapport aux failles nourricières, dans les régions synclinales qui les avoisinent, la localisation de ces zones dans divers étages superposés de la formation auprès de quelques failles, la distribution des rognons calcaires sur la périphérie des régions exploitables, sont autant de faits qui découlent nécessairement de la théorie des failles nourricières; il en est de même de l'absence de fossiles et des variations de textures et de couleur des minerais constatées dans le voisinage de celles-ci.

La concordance de toutes ces preuves nous donne l'espoir que la systématisation que nous avons essayé de faire de la répartition des zones exploitables dans la Pl. V de ce mémoire repose sur une base plausible.

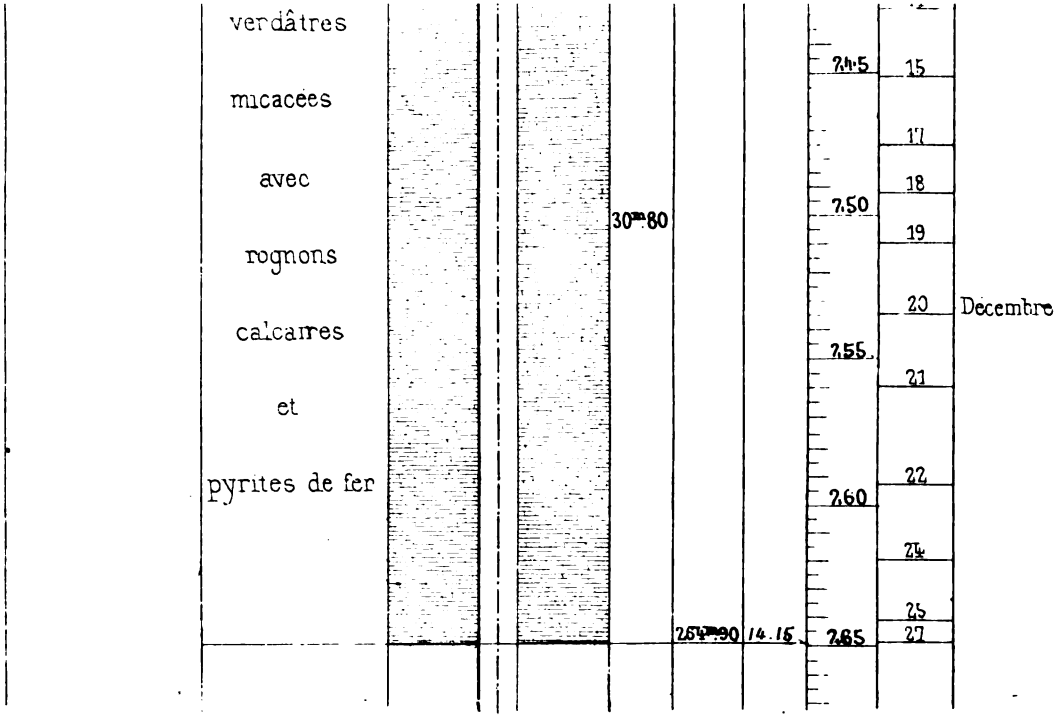
Les délimitations tracées sur cette planche sont, certes, encore incomplètes; mais il sera, sans doute, possible, dans l'avenir, quand on aura réuni de nouvelles observations sur la consistance des couches, de les rendre définitives.

Digitized by Google

Telles qu'elles sont, elles suffiront, pensons-nous, pour évaluer dès maintenant, avec une assez grande approximation, l'importance et la qualité des ressources qu'on pourrait retirer de l'exploitation des différentes zones actuellement concédées.

ANNEXES.

Digitized by Google



La fin du sondage a été constatée officiellement le 30 Décembre 1895 avec la carotte N° 123 prise à 264m90

L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

avec quelques

Digitized by Google

ANNEXE A.

[illegible]		31	0.40	0.40													
Calcaire gris blanc stérile		32	0.45	0.45	17.44	20.90	18.70	6.09	26.40	17.44	20.90	18.70	6.09	26.40	0m.45	226.00	52.35
avec quelques		81	0.40	0.40													
		82	0.45	0.45													
pyrites de fer		83	0.45	0.45	13.69	11.60	45.40	6.94	13.40								
		84	0.45	0.45													
Couche V brune Ep. 0.40 — Minerai, rouge brun		85	0.45	0.45	18.76	19.30	28.40	5.00	18.80	18.76	19.30	28.40	5.00	18.80	0m.40	228.40	50.65
		86	0.45	0.45													
		87	0.45	0.45													
Marnes verdâtres		88	0.50	0.50	6.08	27.20	37.20	2.82	21.20								
		89	0.45	0.45													
micacées avec		90	0.50	0.50						6.08	27.20	37.20	2.82	21.20			
		91	0.35	0.35											5m.05	233.45	45.60
rognons calcaires		92	0.45	0.45													
		93	0.45	0.45													
et pyrites de fer		94	0.50	0.50													
		95	0.45	0.45													
		96	0.45	0.45													
Couche VI (Verte) Ep. 0m.65 — Couche verte compacte avec rognons calcaires		97	0.45	0.45	11.36	9.10	61.20	3.67	8.40	11.36	9.10	61.20	3.67	8.40	0m.65	234.10	44.95
		98	0.45	0.45													
Marnes verdâtre micacées avec rognons calcaires et pyrites de fer		99	0.50	0.50	Dans ce terrain on a pris 25 carottes à différentes hauteurs, le terrain était absolument du même aspect										30m.80	264.90	14.15
		N°123	Dernière	carotte													

Nota : Les analyses ont été faites par le laboratoire de M.M. de Wendel à Hayange (Lorraine) et les échantillons ont été desséchés à 100° avant l'analyse

L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

Digitized by Google

[illegible]		31	0.40	0.40													
Calcaire gris blanc stérile		32	0.45	0.45	17.44	20.90	18.70	6.09	26.40	17.44	20.90	18.70	6.09	26.40	0m.45	228.00	52.35
avec quelques		81	0.40	0.40													
		82	0.45	0.45													
pyrites de fer		83	0.45	0.45	13.69	11.60	45.40	6.94	13.40								
		84	0.45	0.45													
Couche V brune Ep. 0.40 — Minerai, rouge brun		85	0.45	0.45	18.76	19.30	28.40	5.00	18.80	18.76	19.30	28.40	5.00	18.80	0m.40	228.40	50.65
Marnes verdâtres		86	0.45	0.45													
		87	0.45	0.45													
		88	0.50	0.50	6.08	27.20	37.20	2.82	21.20								
		89	0.45	0.45													
micacées avec		90	0.50	0.50						6.08	27.20	37.20	2.82	21.20	5m.05	233.45	45.60
		91	0.35	0.35													
rognons calcaires		92	0.45	0.45													
		93	0.45	0.45													
et pyrites de fer		94	0.50	0.50													
		95	0.45	0.45													
		96	0.45	0.45													
Couche VI (Verte) Ep. 0m.65 — Couche verte compacte avec rognons calcaires		97	0.45	0.45	11.36	9.10	61.20	3.67	8.40	11.36	9.10	61.20	3.67	8.40	0m.65	234.10	44.95
		98	0.45	0.45													
Marnes verdâtre micacées avec rognons calcaires et pyrites de fer		99	0.50	0.50		Dans ce terrain on a pris 25 carottes à différentes hauteurs, le terrain était absolument du même aspect									30m.80	264.90	14.15
		N°123	Dernière	carotte													

Nota : Les analyses ont été faites par le laboratoire de M.M. de Wendel à Hayange (Lorraine) et les échantillons ont été desséchés à 100° avant l'analyse

L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

Digitized by Google

Annexe A_3. — Renseignements divers sur le sondage de Joudreville (CB)

I. Le fonçage de l'avant-puits et l'installation de la baraque de sondage ont été commencés le 1er août 1895, et le 4 septembre, on commençait le battage au trépan.

Arrivée à la formation ferrugineuse, à la profondeur de 191m,80, le 31 octobre :

1° Constatation de la couche rouge II, le 14 novembre, par l'administration des mines, avec la carotte n° 19, à la profondeur de 201m,35 ;

2° Constatation de la couche grise IV, le 28 novembre par l'administration, avec la carotte n° 54, à la profondeur de 215m,53 ;

3° Constatation de la fin du sondage, le 30 décembre, avec la carotte n° 123, à la profondeur de 264m,90.

Toutes les couches ont été traversées dans la formation.

Pour plus de renseignements, on a poussé le trou de sonde jusqu'à 30m,80 en dessous du mur de la formation.

II. Le sondage a été fait dans la commune de Joudreville (Meurthe-et-Moselle), canton « du Haut-de-Quercy », parcelle n° 159.

Sa position est donnée ci-dessous (*fig.* 6).

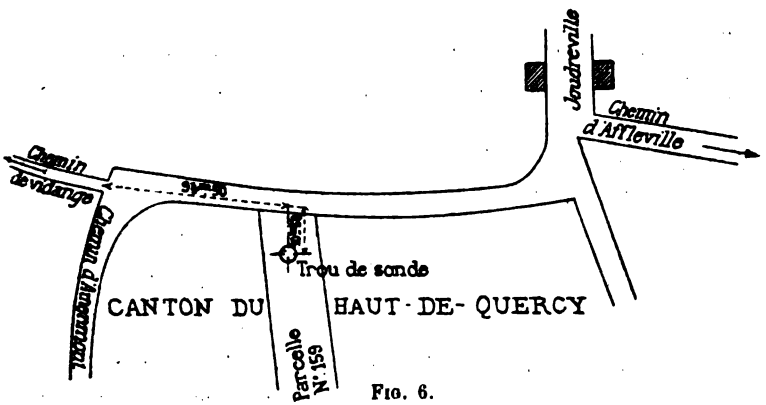


Fig. 6.

Digitized by Google

III. Ci-après les diverses observations qui ont été faites sur les mouvements de l'eau dans le trou de sonde pendant son exécution.

PROFONDEURS du trou de sonde	NIVEAUX DE L'EAU aux diverses profondeurs	OBSERVATIONS
De 0m à 3m,40	Pas d'eau	
De 3m,40 à 28m,50	3m,40	Le niveau est bien constant.
De 28m,50 à 90m,00	24m,00	En arrivant dans le calcaire, l'eau a baissé assez rapidement, pour se maintenir ensuite à 24m,00.
De 90m,00 à 120m,00	De 24m,00 à 17m,00	L'eau est montée lentement à 17m,00.
De 120m,00 à 154m,00	17m,00	L'eau reste stationnaire.
De 154m,00 à 191m,80	16m,00	Id.
De 191m,80 à 205m,55	11m,00	A 191m,80 l'eau est montée rapidement jusqu'à 11m,00 du jour.
De 205m,55 à 208m,30	De 11m,00 à 5m,75	L'eau a continué son ascension.
De 208m,30 à 214m,13	5m,75	L'eau reste stationnaire.
De 214m,13 à 220m,55	De 5m,75 à 2m,20	L'eau a continué son ascension.
De 220m,55 à 264m,90	2m,20	L'eau est restée stationnaire jusqu'à la fin.

ESSAIS D'ÉPUISEMENT.

1° A 102m,65 de profondeur, quand le niveau de l'eau était à 17 mètres du jour, on a épuisé dans le trou de sonde jusqu'à la profondeur de 65 mètres, et on a maintenu l'eau à ce niveau en épuisant 150 litres à la minute;

2° A 214m,81 de profondeur, quand le niveau de l'eau était à 5m,75 du jour, on a épuisé dans le trou de sonde jusqu'à la profondeur de 80 mètres, et on a maintenu l'eau à ce niveau en épuisant 177 litres à la minute;

3° A 264m,90 de profondeur, quand le sondage était terminé et que l'eau se maintenait à 2m,20 du jour, on a à nouveau épuisé l'eau dans le trou de sonde jusqu'à la profondeur de 90 mètres, et on l'a maintenue à ce niveau en épuisant 133 litres à la minute;

NOTA. — Ces observations et ces expériences montrent que l'on a rencontré trois niveaux : un au-dessus des

Digitized by Google

marnes de la surface, un au-dessus des marnes recouvrant la formation, et un troisième dans la formation ; ce dernier niveau, comme dans la plupart des autres sondages, a été supérieur aux autres.

On peut même ajouter qu'avec un trou tubé, de la formation jusqu'au jour, on eût eu certainement un puits artésien.

IV. Renseignements sur le trou de sonde et sur le tubage :

Avant-puits....	$1^m,50$	Profondeur....		$3^m,40$		
Trou de sonde	Diamètre	480^{mm},	de	$3^m,40$	à	$4^m,90$
—	—	430	de	4 ,90	à	192 ,40
—	—	380	de	192 ,40	à	196 ,25
—	—	330	de	196 ,25	à	264 ,90

Un tube de 435 millimètres de diamètre intérieur, longueur 4 mètres, a été placé à $4^m,90$ pour servir de tube-guide à l'entrée du trou.

Pour éviter aussi les éboulements des marnes au-dessus de la formation, on a placé à $192^m,40$ le pied d'un tube de 380 millimètres de diamètre intérieur et de $17^m,70$ de longueur.

A l'intérieur de ce tube et à la profondeur de $196^m,25$, on a placé un tube de 335 millimètres de diamètre intérieur, longueur $8^m,500$, pour guider le trépan à carottes.

Ce sondage s'est fait sans à-coup, et il ne s'y est produit qu'un accident :

A $208^m,85$, l'instrument à chute libre a cassé, et un morceau de fer de $140 \times 50 \times 80$ est resté au fond du trou entre la carotte à moitié battue et la paroi. On l'a retiré sans peine au moyen d'une pince contre-coudée.

On a pu retirer le tube-guide du jour et celui de 335 du fond, mais le tube de diamètre 380, et longueur $17^m,70$, n'a pu être retiré, parce que les marnes ont fait pression autour de lui.

Digitized by Google

Avant d'abandonner le trou de sonde, on l'a bouché de la façon suivante :

D'abord avec des matières argileuses jetées à la pelle et tassées au fur et à mesure avec une cuillère chargée, de la profondeur de 264^{m},90 à 203 mètres.

Puis, afin d'isoler la formation ferrugineuse des terrains supérieurs, on a descendu à la cuillère un bouchon en mortier composé de :

2 parties sable de rivière.
1 partie chaux hydraulique.
1 partie ciment Portland.

Ce bouchon étanche existe de la profondeur de 203 mètres à 178 mètres, soit sur 25 mètres de hauteur.

Puis, de la profondeur de 178 mètres au jour, on a achevé de boucher le trou avec des matières argileuses tassées comme précédemment.

Digitized by Google

ANNEXE A_4. — SONDAGE DE JOUDREVILLE

Par MM. de WENDEL et Cie.

COUPE RÉSUMÉE.

CB, de la carte d'ensemble ; altitude de l'orifice : 279,05.

Commencement du forage au trépan..... 4 septembre 1895.
Arrivée à la formation ferrugineuse..... 31 octobre 1895.
Fin du sondage..... 27 décembre 1895.

PROFONDEUR du mur des couches	DÉSIGNATION DES COUCHES		ÉPAISSEUR	ALTITUDES	OBSERVATIONS
	1° *Morts-terrains constitués par*.....	.....	191m,80		
	Bathonien.....	52,80			
	Bajocien.....	117,20			
191,80.....	Marnes micacées.....	21,80		87,25	Toit de la formation.
	2° *Formation ferrugineuse constituée par*.....	.....	42,30		(*) On ne rencontre presque pas de marnes dans toute cette épaisseur.
	Calcaire ferrugineux avec bancs plus minéralisés (*couche rouge*).....	(*) 17,75	(22,33)		
	Marnes gris bleuâtre et calcaires, avec banc coquillier à la base.....	4,58			
	Couche grise.....	6,42	.....	58,50	Mur de la couche grise. Analyse (α).
220,55.....	.....	.....			
	Calcaire et marnes ferrugineux.	7,45			
228,40.....	Minerai brun.....	0,40	.....	50,65	
	Marnes verdâtres avec rognons calcaires et pyrites.....	5,05			
	Couche verte.....	0,65			
234,10.....				44,95	Mur de la formation.
	3° *Marnes verdâtres micacées avec rognons calcaires et pyrites de fer*.....	30,80	30,80		
264,90.....	Fond du sondage.....			14,15	Fond.

Valeur des couches :

(α) Analyse de la couche grise de 6m,42 { Fe..... 41 ; CaO..... 9 ; SiO^2..... 7 }

Les autres couches sont insignifiantes.

Digitized by Google

RENSEIGNEMENTS DIVERS.

Emplacement du trou de sonde. — Lieu dit du « Haut-de-Quercy », parcelle n° 159 de la commune de Joudreville.

Niveaux d'eau. — Pendant la traversée des marnes jusqu'à 28^{m},50 (*fig.* 7), l'eau était à 3^{m},40 de profondeur. Quand on a percé dans le calcaire, l'eau a baissé assez rapidement et s'est maintenue ensuite à 24 mètres.

Lorsqu'on est arrivé à la profondeur de 90 mètres, soit en dessous du polypier (bajocien supérieur), l'eau est remontée à 17 mètres. Elle est restée stationnaire jusqu'à la rencontre, à 191^{m},80, de la formation ferrugineuse en dessous des marnes micacées. A ce moment, elle est remontée rapidement jusqu'à la profondeur de 11 mètres.

Pendant qu'on forait, jusqu'à la profondeur de 208^{m},30, l'ascension de l'eau a continué jusqu'à 5^{m},75.

L'ascension a recommencé quand on est arrivé à forer les bancs de la couche grise de 214^{m},13 à 220^{m},55 ; le niveau de l'eau s'est alors établi à 2^{m},20 et n'a plus varié.

Ces observations montrent qu'il existe trois niveaux :

Un au-dessus des marnes de Gravelotte ;

Un au-dessous des polypiers et au-dessus des marnes micacées surmontant la formation ferrugineuse ;

Et un troisième dans la formation, au-dessus des marnes toarciennes.

Ce dernier niveau, comme la remarque en a été faite dans d'autres sondages, est le plus artésien, sinon le plus abondant, et il y a lieu de penser qu'avec un trou de sonde tubé, de la formation jusqu'au jour, on aurait eu une venue d'eau jaillissante.

Digitized by Google

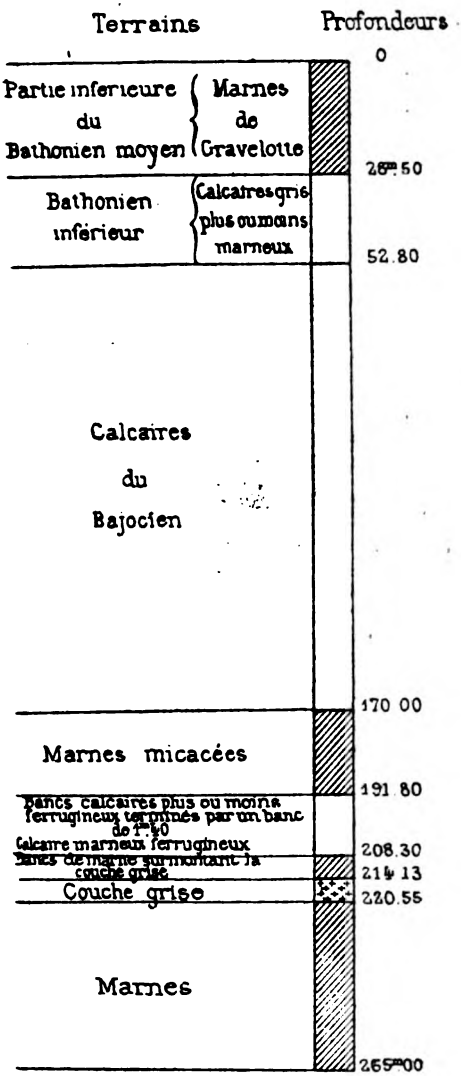


Fig. 7.

Digitized by Google

ANNEXE A_5. — TABLEAU DES RÉSULTATS FOURNIS PAR LES RECHERCHES EXÉCUTÉES DANS LA RÉGION FRANÇAISE.

N. B. — La qualité des couches a été exprimée de la façon suivante :

La teneur en fer est définie par :

4, si elle est égale ou supérieure à 35 p. 100 ;
3, si elle est comprise entre 30 et 35 p. 100 ;
2, si elle est comprise entre 25 et 30 p. 100 ;
1, si elle est inférieure à 25 p. 100.

Quand la teneur en chaux ou en silice dépasse 10 sans excéder 20, on a ajouté les lettres C ou S ;

Si la teneur en chaux ou en silice est supérieure à 20, on a ajouté CC ou SS.

On a classé sous les rubriques :

Couches supérieures, les calcaires ferrugineux supérieurs et les couches rouges ;

Couches moyennes, les couches jaune et grise ;

Couches inférieures, les couches brune, noire et verte.

Digitized by Google

	Désignation du sondage	Profondeur du sondage	Altitudes			Couches supérieures		Couches moyennes		Couches inférieures	
			du mur de la couche grise	du toit de la formation ferrugineuse	de l'orifice du trou de sonde	Épaisseur	Qualité	Épaisseur	Qualité	Épaisseur	Qualité
A	Bréhain	120,61	302,50	322,31	422,31	» 2m,65	» 4 S.	» 3m,70	» 4 S.	non atteintes.	
B	Crusnes	113,60	320,54	339,14	434,14	» 2m,20	» 4 S.	» 3m,55	» ?	non atteintes.	
C	Bréhain	126,30	287,95	303,70	402,05	» 3m,80	» 2 C.	» 4m,25	» 4 C.	2m,10	3 S.
D	Crusnes	128,12	315,00	332,72	429,42	» 2m,12	» (?)	» »	» »	» »	» »
E	Crusnes	184,35	233,26	262,28	398,12	» »	» »	» 4m,39	» 2 CC.	3m,75 »	4 S. »
F	Fillières	125,68	281,87	295,55	396,20	» 1m,43	» 2 C. S.	» 3m,23	» 2 C. S.	» 1m,55	» 3 C. S.
G	Errouville	123,45	288,48	305,62	395,97	» 1m,95	» 4 C.	» 3m,30	» 4 S.	» »	» »
H	Fillières	139,50	267,03	279,94	391,47	» 1m,72	» 4 S.	» 1m,72	» 3 S.	» 1m,15	» 4 S.
I	Bois Saint-Paul	81,50	247,92	256,84	326,12	» 3m,36	» 4 C. S.	» 2m,60	» 4 S.	non atteintes.	
J	Écorcherie	146,31	212,21	234,49	348,49	» »	» »	» »	» »	» 2m,42	» 4 S.
K	Serrouville	132,00	250,45	263,35	376,65	» 2m,61	» 3 C.	» 3m,80	» 4 S.	non atteintes.	
L	Errouville	190,38	193,93	221,03	365,93	» »	» »	» 3m,42	» 3 C.	2m,34 1m,90	4 S. 3 C. S.
M	Serrouville	133,65	261,43	276,98	382,78	2m,20	1 CC. S.	2m,80	2 C.	2m,75	3 S.

Digitized by Google

	DÉSIGNATION DU SONDAGE	PROFONDEUR du sondage	ALTITUDES du mur de la couche grise	ALTITUDES du toit de la formation ferrugineuse	ALTITUDES de l'orifice du trou de sonde	COUCHES SUPÉRIEURES Épaisseur	COUCHES SUPÉRIEURES Qualité	COUCHES MOYENNES Épaisseur	COUCHES MOYENNES Qualité	COUCHES INFÉRIEURES Épaisseur	COUCHES INFÉRIEURES Qualité
N	Serrouville.....	*195,40*	213,80	232,28	361,28	» »	» »	» »	» »	» 0m,80	» 4
O	Ludelange.....	*195,25*	210,00	240,22	390,08	» »	» »	» 3m,50	» 3 CC.	» 1m,18	» 4 S.
P	Avril.....	*154,15*	170,82	183,51	313,25	» »	» »	1m,20 3m,08	4 S. 4 S.	2m,85 1m,70	4 SS. 3 C. SS.
Q	Bois des Moines.....	*165,49*	141,02	157,61	291,86	1m,30 »	2 C. »	0m,62 2m,84	? 3 C.	3m,33 1m,60	3 SS. 3 S.
R	La Chénois.....	*169,60*	125,09	140,80	280,40	» 2m,93	» 4 C.	» 2m,01	» 4 C.	1m,90 2m,71	(?) (?)
S	Baroches.....	*209,30*	29,66	49,34	234,84	» »	» »	» 2m,40	» 4 C.	» »	» »
T	Mussot.....	*163,81*	76,37	94,62	223,32	» »	» »	» 2m,55	» 4	» »	» »
U	Moutiers.....	*115,57*	100,36	121,71	203,21	» 2m,18	» 4	» 3m,55	» 4	0m,72 3m,60	(?) (?)
V	Fond de la Noue.....	*90,59*	129,20	150,92	204,85	» »	» »	» 3m,37	» 4	» »	» »
X	Jœuf.....	*90,65*	103,69	125,41	188,27	» 2m,53	» 4	» 5m,27	» 4 C.	non atteintes	
Y	Valleroy.....	*142,27*	61,56	84,36	190,41	» 2m,75	» 1 CC. S.	1m,20 4m,20	3 C. 4	1m,15 »	3 C. »
Z	Bellevue.....	*197,00*	58,34	75,30	247,34	» 1m,45	» 2 C. S.	3m,66 2m,58	3 C. 4	» »	» »
W	Grand-Fond.....	*74,44*	147,38	167,07	215,47	» 2,40	» 4	1m,94 2m,75	4 4	0m,90	3 SS.

Digitized by Google

	Désignation du sondage	Profondeur du sondage	Altitudes du mur de la couche grise	Altitudes du toit de la formation ferrugineuse	Altitudes de l'orifice du trou de sonde	Couches supérieures Épaisseur	Couches supérieures Qualité	Couches moyennes Épaisseur	Couches moyennes Qualité	Couches inférieures Épaisseur	Couches inférieures Qualité
AA	Abbéville	258,87	— 7,76	9,94	228,31	»	»	»	»	»	»
						»	»	1m,71	(?)	»	»
AB	Daumont	181,03	42,14	57,00	205,03	»	»	»	»	4m,31	3 S.
						»	»	3m,81	2 C. S.	»	»
AC	Moineville	164,00	61,11	80,14	218,67	»	»	»	»	»	»
						»	»	3m,02	4	»	»
AD	Homécourt	149,55	69,83	95,08	205,63	»	»	»	»	»	»
						»	»	5m,30	3 C.	»	»
AE	Spalmail	236,00	— 10,26	2,43	209,13	»	»	»	»	»	»
						»	»	1m,61	4 C.	»	»
AF	Labry	202,97	18,62	35,23	203,56	»	»	»	»	»	»
						»	»	1m,35	3 C. S.	3m,78	4 S.
AG	Tichémont	216,40	23,99	44,32	223,42	»	»	»	»	»	»
						»	»	2m,98	4	»	»
AH	Beaumont	212,26	35,83	54,48	228,48	»	»	»	»	2m,75	4 S.
						»	»	2m,07	4		
AI	Batilly	196,50	60,57	74,59	239,52	»	»	»	»	»	»
						»	»	2m,50	4	»	»
AJ	Fleury	225,11	31,50	50,39	235,42	»	»	»	»	»	»
						»	»	1m,93	4 C.	»	»
AK	Anoux-la-Grange	199,20	115,59	125,49	300,19	»	»	»	»	»	»
						»	»	1m,50	(?)	»	»
AL	Puxe	264,64	— 41,22	— 26,67	195,28	»	»	»	»	»	»
						»	»	1m,54	1 C. S.	»	»
AM	Ebany	234,68	0,35	17,13	212,63	»	»	»	»	»	»
						»	»	2m,55	3 C.	»	»

Digitized by Google

	DÉSIGNATION DU SONDAGE	PROFONDEUR du sondage	ALTITUDES du mur de la couche grise	ALTITUDES du toit de la formation ferrugineuse	ALTITUDES de l'orifice du trou de sonde	COUCHES SUPÉRIEURES Épaisseur	COUCHES SUPÉRIEURES Qualité	COUCHES MOYENNES Épaisseur	COUCHES MOYENNES Qualité	COUCHES INFÉRIEURES Épaisseur	COUCHES INFÉRIEURES Qualité
AN	Jarny	245,24	— 25,30	— 4,30	204,65	» »	» »	» 5m,00	» 4 C.	» »	» »
AO	Breuillot	221,98	— 4,43	17,91	203,61	» »	» »	» 2m,72	» 4 C.	» »	» »
AP	Giraumont	267,00	12,82	36,47	224,67	» »	» »	» 1m,90	» 4	» »	» »
AQ	Doncourt	175,28	99,29	112,77	258,27	» »	» »	» 0m,80	» (?)	» 1m,12	» 4 S.
AR	Bruville	202,17	45,51	60,91	232,91	» »	» »	» 1m,50	» (?)	» »	» »
AS	Droitaumont	262,27	— 30,86	— 7,82	216,33	» »	» »	» 1m.92	» 3 (?)	» »	» »
AT	Porcher	266,65	— 44,85	— 25,40	195,84	» »	» »	» 2m,85	» 4	» »	» »
AU	Ville-sur-Yron	250,00	28,96	42,46	223,96	» »	» »	rien d'exploitable		» »	» »
AV	Mancieulles	200,00	65,66	85,62	247,62	» »	» »	» 1m,36	» pauvre	» »	» »
AW	Tucquegnieux	250,74	17,60	49,01	259,96	0m,73 1m,25	3 C. S. (?)	» 6m,69	» 4 C.	» »	» »
AX	Affléville	285,05	— 15 (?)	3,01	244,28	» »	» »	rien d'exploitable		» »	» »
AY	Serrouville (près du sondage N)	178,27	210,05	231,95	369,25	» »	» »	» »	» »	» 0m,75	» 4 C. S.
AZ	Malmaison	227,35	56,66	79,36	265,86	» 2m,45	» 3 S.	» 3 C.	» »	» »	» »

Digitized by Google

	DÉSIGNATION DU SONDAGE	PROFONDEUR du sondage	ALTITUDES du mur de la couche grise	ALTITUDES du toit de la formation ferrugineuse	ALTITUDES de l'orifice du trou de sonde	COUCHES SUPÉRIEURES Épaisseur	COUCHES SUPÉRIEURES Qualité	COUCHES MOYENNES Épaisseur	COUCHES MOYENNES Qualité	COUCHES INFÉRIEURES Épaisseur	COUCHES INFÉRIEURES Qualité
BA	Immonville	*223,75*	46,44	65,85	248,70	»	»	rien d'exploitable		»	»
						»	»			»	»
BB	Anderny	*248,03*	89,99	123,04	322,59	0m,85	3 C. S.	»	»	»	»
						0m,75	4 C. S.	4m,66	3 C.	»	»
BC	Bois Saint-Pierre	*226,40*	69,89	99,59	279,09	»	»	»	»	»	»
						0m,90	4 C.	3m,70	4 C.	»	»
BD	Sancy	*226,29*	93,82	125,92	303,42	0m,74	4	»	»	1m,07	3 C. S.
						0m,90	(?)	3m,87	3 C.	2m,29	3 C. S.
BE	Anoux	*245,50*	38,43	58,83	257,83	»	»	»	»	»	»
						»	»	1m,16	pauvre	»	»
BF	Mainville	*262,50*	32,95	68,43	274,43	»	»	»	»	»	»
						»	»	6m,03	4 C.	»	»
BG	Malavillers	*211,34*	144,90	175,21	340,25	2m,64	(?)	»	»	»	»
						1m,40	4 C.	2m,45	4 C.	2m,28	(?)
BH	Grand Bois	*213,60*	69,00	100,28	267,38	»	»	»	»	1m,48	2 C. SS.
						»	»	4m,86	4 C. S.	0m,77	4 S.
BI	Mairy	*224,45*	80,08	109,97	281,57	»	»	»	»	»	»
						»	»	3m,75	3 C.	»	»
BJ	Bazonville	*230,65*	117,55	156,10	331,10	»	»	»	»	3m,15	4 S.
						1m,35	4 C. S.	2m,70	4 C.	1m,05	3 S.
BK	Audun	*215,98*	153,16	186,06	351,19	2m,15	4 S.	0m,48	4 S.	»	»
						1m,60	3 S.	2m,00	4	3m,60	4 S.
						1m,25	4 S.			0m,75	4 SS.
BL	Sart	*198,75*	95,56	122,07	278,87	»	»	»	»	»	»
						1m,60	4 C. S.	3m,87	4	2m,78	4 S.
BM	Saint-Pierremont	*172,20*	108,23	129,43	274,43	»	»	»	»	non atteintes	
						2m,65	3 C. S.	4m,10	4 C.		

Digitized by Google

DÉSIGNATION DU SONDAGE		PROFONDEUR du sondage	ALTITUDES du mur de la couche grise	ALTITUDES du toit de la formation ferrugineuse	ALTITUDES de l'orifice du trou de sonde	COUCHES SUPÉRIEURES Épaisseur	COUCHES SUPÉRIEURES Qualité	COUCHES MOYENNES Épaisseur	COUCHES MOYENNES Qualité	COUCHES INFÉRIEURES Épaisseur	COUCHES INFÉRIEURES Qualité
BN	Avril	*179,10*	115,90	136,50	277,70	» 0m,63	» 4 C.	1m,48 3m,78	3 S. 4 C.	0m,80 0m,75	3 C. 4 S.
BO	Trieux	*255,77*	63,91	93,56	303,06	» »	» »	0m,55 3m,96	3 S. 4	» »	» »
BP	Trieux	*257,27*	72,70	105,03	318,38	» »	» »	» 4m,75	» 4 C.	» »	» »
BQ	Sancy	*226,00*	75,30	107,50	286,75	» »	» »	» 3m,85	» 4 C.	» »	» »
BR	Saint-Pierremont	*185,38*	96,70	117,79	271,40	» »	» »	2m,05 3m,80	2 SS. 4 C.	» »	» »
BS	Bettainvillers	*236,65*	70,35	97,00	287,80	» 1m,40	» 4 C.	» 4m,35	» 4 C.	» 0m,80	» 4 S.
BT	Mance	*193,20*	81,65	104,20	257,40	3m,20 »	1 CC. S. »	» 2m,90	» 3 C. S.	» »	» »
BU	Beuvillers	*187,08*	191,47	222,95	367,70	1m,45 »	2 CC. »	» 3m,07	» 3 C.	» »	» »
BV	Bois-de-la-Dame	*260,05*	47,12	76,77	289,77	0m,40 »	4 C. »	» 5m,49	» 4	» 0m,99	» 3 S.
BX	Gondrecourt	*271,20*	25 (?)	49,88	253,88	» »	» »	rien d'exploitable		» »	» »
BY	Houdelaucourt	*250,85*	44,17	46,02	232,47	» »	» »	» 1m,60	» 3 C.	» »	» »
BZ	Eton	*251,96*	(?)	14,00	240,00	» »	arrêté dans les calcaires ferrugineux				
BW	Amermont	*245,09*	33,22	61,11	258,61	» »	» »	» 7m,21	» 4	» »	»

Digitized by Google

	DÉSIGNATION DU SONDAGE	PROFONDEUR du sondage	ALTITUDES du mur de la couche grise	ALTITUDES du toit de la formation ferrugineuse	ALTITUDES de l'orifice du trou de sonde	COUCHES SUPÉRIEURES Épaisseur	COUCHES SUPÉRIEURES Qualité	COUCHES MOYENNES Épaisseur	COUCHES MOYENNES Qualité	COUCHES INFÉRIEURES Épaisseur	COUCHES INFÉRIEURES Qualité
CA	Baroncourt.....	*256,00*	6,53	25,88	238,53	»	»	»	»	»	»
						»	»	3m,00	3 C. S.	»	»
CB	Joudreville.....	*264,90*	58,50	87,25	279,05	»	»	»	»	»	»
						»	»	6m,42	4	»	»
CC	Domremy.....	*241,10*	16,59	34,62	238,43	»	»	rien d'exploitable			
						»	»				
CD	Bouligny.....	*265,60*	19,64	58,09	276,79	»	»	3m,40	3 S.	»	»
						»	»	2m,55	4 SS.	»	»
CE	Pienne.....	*233,00*	86,45	110,25	299,40	»	»	»	»	»	»
						»	»	5m,68	4	»	»
CF	La Malgré.....	*237,35*	89,31	114,21	309,55	»	»	»	»	»	»
						»	»	5m,80	4 C.	»	»
CH	Landres.....	*220,13*	113,23	136,83	312,08	»	»	»	»	»	»
						»	»	6m,25	4 C.	»	»
CI	Amermont.....	*241,40*	34,13	61,68	255,18	»	»	»	»	»	»
						»	»	6m,40	4	»	»
CM	Avillers.....	*223,46*	62,76	90,78	270,98	»	»	»	»	»	»
						»	»	1m,05	pauvre	1m,69	4 SS.
CN	Landres.....	*202,82*	120,97	149,71	311,71	»	»	»	»	»	»
						»	»	8m,64	3 C.	»	»
CO	Dommary.....	*260,50*	22,16	45,16	262,16	»	»	»	»	»	»
						»	»	4m,75	4	»	»
CP	Landres.....	*235,20*	84,31	109,77	297,83	»	»	»	»	»	»
						»	»	8m,63	4 C.	»	»
CQ	Bouligny.....	*252,50*	48,46	72,96	282,21	»	»	»	»	»	»
						»	»	6m,25	3 C.	»	»

Digitized by Google

	DÉSIGNATION DU SONDAGE	ABOFONDEUR du sondage	ALTITUDES du mur de la couche grise	ALTITUDES du toit de la formation ferrugineuse	ALTITUDES de l'orifice du trou de sonde	COUCHES SUPÉRIEURES Épaisseur	COUCHES SUPÉRIEURES Qualité	COUCHES MOYENNES Épaisseur	COUCHES MOYENNES Qualité	COUCHES INFÉRIEURES Épaisseur	COUCHES INFÉRIEURES Qualité
CR	Landres	*210,96*	115,81	141,41	313,41	»	»	»	«	»	»
						»	»	6m,92	4	»	»
CS	Bonvillers	*272,30*	56,10	91,75	306,70	»	»	»	»	»	»
						2m,30	4 C.	4m,30	4 C.	»	»
CT	Norroy	*241,80*	83,27	103,91	304,21	»	»	»	»	»	»
						»	»	4m,42	4 C.	»	»
CU	Domprix	*199,32*	96,45	120,50	276,88	»	»	3m,40	1 C. SS.	3m,83	4 S.
						»	»	»	»	1m,30	3 C. S.
CV	Murville	*188,20*	153,27	172,87	331,87	»	»	»	»	1m,14	2 SS.
						1m,35	3 C. S.	3m,78	2 CC.		
CX	Preutin	*190,67*	142,85	167,39	320,50	»	»	»	»	»	»
						»	»	5m,91	3 C.	»	»
CZ	Affléville	*253,65*	9,63	37,68	247,98	»	»	»	»	»	»
						»	»	5m,45	1 C. S.	»	»
DA	Norroy (lavoir)	*219,65*	75,68	94,68	265,98	»	»	»	»	»	»
						»	»	1m,80	3 C.	»	»
DB	Pienne n° 2 (Tresbois)	*270,75*	64,01	95,11	310,06	»	»	»	»	»	»
						»	»	8m,73	3 C.	»	»
DC	Murville	*196,27*	149,13	176,76	335,11	»	»	»	»	»	»
						»	»	5m,94	4	»	»
DE	Anderny	*215,14*	128,86	158,22	329,42	»	»	»	»	»	»
						3m,06	3 C.	3m,87	4	»	»
DF	Bonvillers	*237,15*	101,25	131,75	317,25	»	»	»	»	»	»
						2m,20	3 C.	4m,35	4 C.	»	»
DG	Landres (n° 2)	*239,80*	108,15	134,35	325,85	»	»	»	»	»	»
						»	»	6m,65	4 C.	»	»

Digitized by Google

	DÉSIGNATION DU SONDAGE	PROFONDEUR du sondage	ALTITUDES du mur de la couche grise	ALTITUDES du toit de la formation ferrugineuse	ALTITUDES de l'orifice du trou de sonde	COUCHES SUPÉRIEURES Épaisseur	COUCHES SUPÉRIEURES Qualité	COUCHES MOYENNES Épaisseur	COUCHES MOYENNES Qualité	COUCHES INFÉRIEURES Épaisseur	COUCHES INFÉRIEURES Qualité
DH	Joudreville (Laidbois).	*237,90*	78,94	104,19	295,24	» »	» »	» 6m,85	» 4 C.	» »	» »
DI	Bertrameix.....	*210,96*	99,85	122,99	309,71	» »	» »	4m,26 »	3 C. S. »	» »	» »
DK	Murville.....	*208,39*	135,83	168,25	334,06	» 1m,98	» 3 CC.	2m,34 1m,50	3 C. 2 C. S.	» »	» »
DL	Mercy-le-Haut.....	*200,80*	176,67	209,67	367,01	» 4m,08	» 4 C.	» inexploitable	»	» »	» »
DM	Murville.....	*203,98*	179,78	204,99	364,01	0m,97 1m,65	4 C. 3 C.	» inexploitable	»	» »	» »
DN	Malavillers.....	*193,60*	191,89	225,14	369,64	» 2m,85	» 3 C. S.	» inexploitable	»	» »	» »
DO	Norroy-le-Sec.....	*228,36*	92,42	100,15	296,15	» »	» »	» 1m,00	» pauvre	» »	» »
DP	Landres (n° 3).....	*238,65*	104,95	133,1[illegible]	324,00	» »	» »	» 9m,20	» 4 C.	» »	» »
DQ	Saint-Pierrevillers....	*201,15*	?	58,1[illegible]	217,20	» »	arrêté dans les calcaires ferrugineux				
DR	La Caulre	*189,16*	130,38	141,1[illegible]	301,12	» »	» »	» 1m,60	» 2 SS.	» »	» »
DS	Hatrize.....	*204,25*	29,20	43,6[illegible]	219,60	» »	» »	» 2m,63	» 3 C. S.	3m,65	4 S.
DT	Sainte-Catherine.....	*216,50*	20,03	36,0[illegible]	221,08	» »	» »	» 2m,85	» 4	» »	» »
DU	La Jument.....	*192,73*	110,61	126,21	286,02	» »	» »	» 5m,29	» 2 C. SS.	» »	» »

Digitized by Google

DÉSIGNATION DU SONDAGE		PROFONDEUR du sondage	ALTITUDES du mur de la couche grise	ALTITUDES du toit de la formation ferrugineuse	ALTITUDES de l'orifice du trou de sonde	COUCHES SUPÉRIEURES Épaisseur	COUCHES SUPÉRIEURES Qualité	COUCHES MOYENNES Épaisseur	COUCHES MOYENNES Qualité	COUCHES INFÉRIEURES Épaisseur	COUCHES INFÉRIEURES Qualité
DV	Mars-la-Tour.....	*213,95*	49,86	72,09	237,71	»	»	inexploitable		»	»
						»	»			»	»
DX	Doncourt.....	*188,72*	96,37	101,87	262,02	»	»	»	»	»	»
						»	»	2m,89	3 SS.	1m,04	2 C. S.
EA	Les Baroches.....	*218,03*	16,88	35,15	220,65	»	»	»	»	2m,75	4 S.
						»	»	4m,07	4 C. S.	»	»
EB	Bouvigny.....	*233,75*	25,06	46,96	244,96	»	»	»	»	»	»
						»	»	2m,15	2 SS.	»	»
EC	Lixières.....	*237,74*	40,78	60,37	241,87	»	rien d'exploitable				»
						»					»
ED	Preutin.....	*194,36*	143,91	172,75	324,75	»	»	»	»	»	»
						»	»	6m,89	1 C. SS.	3m,01	3 SS.
EE	Xivry-Circourt.....	*192,95*	105,46	131,30	284,40	»	»	»	»	3m,21	3 SS.
						»	»	4m,11	1 SS.	2m,62	4 S.
EF	Higny.....	*197,76*	137,46	163,01	319,26	»	»	»	»	»	»
						»	»	4m,66	1C. SS.	»	»
EH	Rouvrois.....	*198,83*	?	48,40	231,65	»	arrêté dans les calcaires ferrugineux				
						»					
EL	Landres.....	*198,10*	146,58	174,71	333,41	»	»	»	»	»	»
						»	»	8m,13	3 C.	»	»
EM	Joudreville.....	*237,57*	47,74	60,50	261,35	»	»	1m,35	2 C. S.	»	»
						»	»	1m,43	1 C. S.	»	»
EN	Avillers.....	*246,91*	74,10	96,06	293,56	»	»	»	»	5m,22	2 SS.
						»	»	1m,62	1SS.	1m,00	2 SS.
EO	Xivry.....	*243,63*	78,50	102,40	305,53	»	»	»	»	»	»
						»	»	2m,09	1 C. SS.	4m,66	3 SS.

Digitized by Google

	DÉSIGNATION DU SONDAGE	PROFONDEUR du sondage	ALTITUDES du mur de la couche grise	ALTITUDES du toit de la formation ferrugineuse	ALTITUDES de l'orifice du trou de sonde	COUCHES SUPÉRIEURES Épaisseur	COUCHES SUPÉRIEURES Qualité	COUCHES MOYENNES Épaisseur	COUCHES MOYENNES Qualité	COUCHES INFÉRIEURES Épaisseur	COUCHES INFÉRIEURES Qualité
EP	Le Haut-d'Ane.....	*200,30*	115,59	143,70	302,55	» »	» »	2m,82 5m,34	2 CC. 1 C. S.	2m,86 2m,87	2SS. 4 S.
ER	Audun-le-Roman.....	*167,52*	204,70	231,33	360,23	» 2m,00	» 1 C. SS.	» 3m,48	» 3 C.	2m,35 1m,00	1 C. SS. 2 SS.
ET	Domprix.....	*236,33*	71,58	107,64	296,14	1m,20 1m,96	3 C. S. 3 C. S.	7m,68 7m,16 1m,45	1 CC. SS. 2 SS. 4 SS.	1m,20 0m,99	4 SS. 4 S.
EU	Le Chanois.....	*184,28*	131,90	161,60	306,40	1m,08 4m,86	2 CC. S. 1 C. SS.	1m,64 1m,85	2 SS. 4 SS.	1m,70 »	4 S. »
EV	Hatrize.....	*214,20*	25,27	40,27	222,77	» »	» »	» 2m,30	» 2 CC.	1m,39 »	2 SS. »
EX	Les Baroches.....	*233,30*	13,80	31,85	218,60	» »	» »	» 2m,75	» 4 C.	2m,29 »	2 SS. »
EY	Ozerailles.....	*269,59*	— 7,05	20,24	222,79	» »	rien d'exploitable				
EZ	Anoux.....	*247,32*	32,93	55,48	258,73	» 2m,71	» 4	» 3m,06	» 4 C.	» »	» »
FA	Eton.....	*281,60*	— 19,13	33,35	246,79	» »	» »	» 2m,24	» 3 S.	» »	» »
FB	Ville-au-Montois.....	*160,29*	176,32	202,68	318,08	» »	» »	2m,40 4m,16	3 SS. 4 SS.	2m,17 »	3 S. »
FC	La Ville-aux-Prés....	*247,52*	— 1,55	12,84	220,34	» »	rien d'exploitable				» »
FD	Brainville.....	*302,27*	— 71,45	— 58,75	205,75	» »	rien d'exploitable				» »
FG	Bazailles.....	*162,24*	161,20	185,11	304,86	» »	» »	6m,84 3m,85	4 SS. 4 SS.	1m,75 »	4 S. »

Digitized by Google

DÉSIGNATION DU SONDAGE		PROFONDEUR du sondage	ALTITUDES du mur de la couche grise	ALTITUDES du toit de la formation ferrugineuse	ALTITUDES de l'orifice du trou de sonde	COUCHES SUPÉRIEURES Épaisseur	COUCHES SUPÉRIEURES Qualité	COUCHES MOYENNES Épaisseur	COUCHES MOYENNES Qualité	COUCHES INFÉRIEURES Épaisseur	COUCHES INFÉRIEURES Qualité
FH	Norroy-le-Sec.	*252,65*	43,75	60,17	259,92	» »	» »	» 3m,12	» 3 C.	» »	» »
FI	Lantefontaine.	*217,39*	24,03	43,03	227,12	» »	» »	» 1m,96	» 3 C.		
FK	Baslieux	*212,30*	207,47	217,12	350,50	»	»	1m,60 2m,95	4 S. 4 SS.	1m,87 »	3 SS. »
FL	Moutiers.	*157,48*	116,65	135,98	258,38	» 3m,40	» 4	2m,67 2m,33	4 C. 4 C.	1m,72 4m,43	3 SS. 3 C. S.
FM	Auboué (puits).....	*136,20*	68,00	91,83	194	» »	» »	1m,90 3m,96	3 C. 4	» »	» »
FN	Haut-des-Tapes (puits). Homécourt	*122,38*	90,43	114,30	204	» 3m,40	» 4 C.	» 3m,55	» 4 C.	0m,80 »	2 SS. »
FO	Moutiers (puits).....	*100,37*	115,74	135,41	201	1m,46 »	4 C. »	1m,45 3m,74	3 C. 4 C.	1m,75 2m,05	3 SS. 3 C.
FP	Fond de la Noue (puits) Homécourt	*83,10*	116,84	136,99	190	» 3m,60	» 4 C.	2m,50 3m,30	3 C. 4 C.	1m,20	4 S.
FQ	Boudrezy.....	*186,16*	184,96	205,78	350,38	2m,26	2 C. S.	3m,49	3 C. S.	2m,79	2 C.SS.

Digitized by Google

Annexe A_6. — Renseignements sur l'altitude des couches dans la région allemande.

Désignation de la localité	Altitude du mur de la couche grise	Observations Les numéros de sondages portés dans cette colonne sont ceux de la publication *Stahl und Eisen*.	
			Nos
ZA	281,45	D'après M. Kohlmann (*Stahl und Eisen* 1898), sondage	25
ZB	269,20	— id. —	24
ZC	250,20	— id. —	26
ZD	270,65	— id. —	23
ZE	254,17	— id. —	22
ZF	252,55	— id. —	21
ZG	239,91	— id. —	27
ZH	230,02	— id. —	28
ZI	201,28	— id. —	29
ZK	213,92	— id. —	30
ZL	207,00	— id. —	32
ZM	196,70	— id. —	33
ZN	174,82	— id. —	34
ZO	170,12	— id. —	35
ZP	173,84	— id. —	36
ZQ	165,62	— id. —	37
ZR	153,62	— id. —	39
ZS	140,03	— id. —	40
ZT	142,69	— id. —	41
ZU	136,36	— id. —	42
ZV	131,02	— id. —	43
ZX	78,97	— id. —	44
ZY	68,79	— id. —	45
ZZ	67,16	— id. —	46
YA	286,60	— id. —	6
YB	282,60	— id. —	7
YC	278,76	— id. —	5
YD	258,23	— id. —	8
YE	240,08	— id. —	13
YF	231,44	— id. —	12
YG	226,92	— id. —	14
YH	251,68	— id. —	9
YI	258,94	— id. —	4
YK	286,08	— id. —	1
YL	247,96	— id. —	10
YM	182,20	— id. —	16
YN	251,47	— id. —	3
YO	141,92	— id. —	20
YP	129,66	— id. —	19
YQ	143,62	— id. —	16 *a*
YR	140,58	— id. —	16 *b*
YS	158,74	— id. —	17
YT	98,84	— id. —	18
YU	129,13	D'après MM. de Wendel, sondage de Ludelange.	
YV	115,68	id. Tressange.	
YX	111,73	id. d'Havange.	
YY	41,20	D'après M. Engel, sondage Elisabeth.	

N. B. — Les indications d'altitude qui suivent se rapportent au mur de la couche noire, situé à 8 ou 10 mètres en dessous de celui de la couche grise.

Digitized by Google

DÉSIGNATION de la localité	ALTITUDE du mur de la couche noire	OBSERVATIONS			
					Nos
YZ	135,60	D'après M. Hoffmann (*Stahl und Eisen* 1896), sondage			6
XA	153,60	—	id.	—	7
XB	76,92	—	id.	—	26
XC	154,40	—	id.	—	25
XD	212,43	—	id.	—	24
XE	248,80	D'après M. Engel.			
XF	195,24	D'après M. Hoffmann		id.	29
XG	161,00	id.		id.	30
XH	190,70	D'après M. Engel			
XI	89,94	D'après M. Hoffmann		id.	31
XK	81,41	—	id.	—	34
XL	46,75	—	id.	—	32
XM	40,13	—	id.	—	33
XO	76,64	—	id.	—	38
XP	96,11	—	id.	—	35
XQ	128,60	—	id.	—	37
XR	146,12	—	id.	—	36

Digitized by Google

ANNEXE A7.

Département de Meurthe-et-Moselle.

NOMENCLATURE DES MINES DE FER.

NUMÉROS	DESIGNATION des concessions	DATES d'institution	SUPERFICIE Hect.	PROPRIÉTAIRES ou exploitants
	1° Bassin de Briey (*).			
1	Coulmy.....	26 juil. 1844.	62	Société métallurgique de Gorcy.
2	Chatelet.....	9 nov. 1844.	6	Boutmy et Cie.
3	Romain.....	9 août 1848.	140	Société métallurgique de Gorcy.
4	Warnimont.....	24 juil. 1857. 24 fév. 1864.	114	Comte de Ludre.
5	Senelle.....	27 juil. 1889. 30 août 1893.	784	Société des hauts-fourneaux de la Chiers.
6	Mont-Saint-Martin.	17 sep. 1864. 27 avril 1881. 6 avril 1882.	626	Société des aciéries de Longwy.
7	Mexy.....	7 fév. 1866.	230	F. de Saintignon et Cie.
8	Saulnes.....	14 août 1867. 7 nov. 1890.	97	G. Raty et Cie et F. de Saintignon et Cie.
9	Lexy.....	21 déc. 1867.	469	Société des forges de la Providence.
10	Pulventeux.....	21 déc. 1867.	216	Société des minières et hauts-fourneaux de Pulventeux.
11	Moulaine.....	1er fév. 1868.	371	Société des aciéries de Longwy.
12	Mont-de-Chat....	2 sep. 1868.	221	Société des hauts-fourneaux de la Chiers.
13	Rehon.....	1er mai 1869.	343	F. de Saintignon et Cie.
14	Herserange.....	13 juil. 1870.	433	Société des aciéries de Longwy.
15	Villerupt.....	25 fév. 1873. 19 juin 1875.	326	Société métallurgique d'Aubrives-Villerupt.
16	Longlaville.....	25 juin 1873.	261	G. Raty et Cie.
17	Micheville.....	21 nov. 1874. 10 oct. 1878.	400	Société des aciéries de Micheville.
18	Hussigny.....	3 janv. 1875. 19 juin 1875.	206	Société des forges de la Providence et Société des aciéries de Longwy.
19	Jœuf.....	10 fév. 1882. 17 août 1885.	1.312	MM. de Wendel et Cie.
20	Cantebonne.....	19 juin 1875.	10	Société des aciéries d'Angleur.
21	Godbrange.....	10 oct. 1878.	952	Société des mines de Godbrange.
22	Cosnes.....	1er juin 1882.	55	Société lorraine industrielle.
23	Bois-d'Avril	1er sep. 1883.	432	Les petits-fils de F. de Wendel.
24	Serrouville.....	17 mai 1884.	720	Société des forges de Brévilly.
25	Homécourt.....	11 août 1884.	894	Société de Vezin-Aulnoye.
26	Auboué.....	11 août 1884.	671	Société des hauts-fourneaux et fonderies de Pont-à-Mousson.
27	Moutiers.....	11 août 1884.	696	Société de Moutiers.
28	Valleroy.....	10 mars 1886.	886	Société des aciéries de Longwy.
29	Bréhain.....	10 mars 1886.	373	Société des aciéries de Micheville.
30	Tiercelet.....	10 mars 1886.	769	Syndicat des mines de Tiercelet.
31	Crusnes.....	10 mars 1886.	475	Société métallurgique d'Aubrives-Villerupt.
32	Moineville.....	18 juin 1886.	766	F. de Saintignon et Cie.
33	Giraumont.....	18 juin 1886.	800	Cie des forges de Châtillon, Commentry et Neuves-Maisons.
34	Jarny.....	18 juin 1886.	812	Société des hauts-fourneaux de Maubeuge.
35	Fleury.....	18 juin 1886.	808	Société des aciéries de Pompey.

(*) Les mêmes numéros d'ordre ayant été inscrits sur la carte du bassin (Pl. V), il sera facile, en s'y référant, de connaître l'emplacement des diverses concessions.

Digitized by Google

NUMÉROS	DÉSIGNATION des concessions	DATES d'institution	SUPERFICIE	PROPRIÉTAIRES ou exploitants
			Hect.	
36	Jouaville.....	19 mars 1887.	1.032	G. Raty et Cie.
37	Labry.....	19 mars 1887.	858	Cie des forges de Châtillon, Commentry et Neuves-Maisons.
38	Briey.....	7 avril 1887.	1.093	Schneider et Cie.
39	Batilly.....	23 mai 1887.	688	Compagnie des forges de Châtillon, Commentry et Neuves-Maisons.
40	Droitaumont.....	5 août 1887.	1.170	Schneider et Cie.
41	Conflans.....	12 déc. 1887.	820	Viellard-Migeon et Cie.
42	Brainville.....	27 août 1889.	1.115	Société des forges de la Providence.
43	Bellevue.....	5 mars 1894. 30 avril 1895.	589	Société des hauts-fourneaux de la Chiers.
44	Génaville.....	8 mars 1894. 30 avril 1895.	686	Société des aciéries de Micheville.
45	Errouville.....	8 nov. 1895.	948	Société lorraine industrielle.
46	Villières.....	23 août 1896.	805	Société de Villerupt-Laval-Dieu.
47	Sancy.....	31 mars 1899.	735	G. Raty et Cie.
48	Trieux.....	31 mars 1899.	390	E. Thomas.
49	Bazonville.....	31 mars 1899.	600	Société des aciéries de Micheville.
50	Mance.....	31 mars 1899.	805	MM. de Wendel et Cie.
51	Tucquegnieux....	31 mars 1899.	1.196	Société des aciéries de Longwy.
52	Mairy.....	31 mars 1899.	1.092	Société des hauts-fourneaux et fonderies de Pont-à-Mousson.
53	Anderny.....	31 mars 1899.	814	Société de Vezin-Aulnoye.
54	Beuvillers.....	3 juin 1899.	723	Société des hauts-fourneaux de la Chiers.
55	Chevillon.....	30 août 1899.	712	Cie des forges et aciéries de la marine et des chemins de fer.
56	Malavillers.....	20 mars 1900.	732	Société de Denain et d'Anzin.
57	Murville....	20 mars 1900.	496	Société des hauts-fourneaux de Maubeuge.
58	Bertrameix.....	20 mars 1900.	425	Société de Senelle-Maubeuge.
59	Landres.....	20 mars 1900.	533	Société des aciéries de Micheville.
60	La Mourière.....	20 mars 1900.	474	Société des aciéries de Pompey.
61	Bouligny.....	20 mars 1900.	436	A. Chappée.
62	Pienne.....	20 mars 1900.	862	Société des forges et aciéries du Nord et de l'Est.
63	Joudreville.....	20 mars 1900.	501	Société de Commentry-Fourchambault.
64	Amermont.....	20 mars 1900.	546	Société de la Providence et F. de Saintignon et Cie. MM. Capitain, Gény et Cie.
65	Dommary.....	20 mars 1900.	475	MM. J. Marrellot et Cie. Société des forges de Champagne.
66	Bettainvillers.. ..	20 mars 1900.	463	Société métallurgique de Gorcy.
67	Ville-au-Montois .	.....	1.048	.....
68	Anoux.....	27 fév. 1902.	257	Consortium de diverses sociétés
69	Saint-Pierremont (Nord)	27 fév. 1902.	325	Consortium de diverses sociétés.
69 bis	Saint-Pierremont (Sud).....	27 fév. 1902.	250	MM. de Wendel et Cie.
70	Hatrize.....	.....	842	.....
71	Bruville.....	.....	874	.....

Digitized by Google

NUMEROS	DÉSIGNATION des concessions	DATES d'institution	SUPERFICIE Hect.	PROPRIÉTAIRES ou exploitants
	2e Bassin de Nancy.			
1	Champigneulles..	3 août 1848.	427	Simon, Lemut et Cie Keller et Bourgeois. Société de Denain et d'Anzin (amodiataire).
2	Chavigny - Van - dœuvre.....	16 juin 1856. 9 janv. 1867. 20 mars 1900.	789	Société des forges et aciéries du Nord et de l'Est.
3	Marbache.....	16 janv. 1858.	588	Société des hauts-fourneaux et fonderies de Pont-à-Mousson.
4	Frouard.....	10 mars 1858.	741	Société des forges et fonderies de Montataire.
5	Bouxières - aux - Dames.....	16 août 1859.	322	Société des forges et fonderies de Montataire.
6	La Voiletriche...	26 sept. 1859.	341	Compagnie de Châtillon-Commentry et Neuves-Maisons.
7	Liverdun.....	17 mars 1860. 20 mars 1900.	1.021	Compagnie de Châtillon-Commentry et Neuves-Maisons: Vivenot.
8	Hazotte.....	28 avril 1860.	414	Société de Denain et d'Anzin (amodiataire). Société des forges et fonderies de Montataire.
9	Pompey.....	20 janv. 1884.	127	Société de Vezin-Aulnoye (amodiataire).
10	Avant-Garde.....	23 mai 1863.	277	Société de Vezin-Aulnoye.
11	Buthgnémont....	17 août 1864.	301	Société des hauts-fourneaux de Maubeuge.
12	Boudonville.	17 août 1864.	430	Société de Vezin-Aulnoye.
13	Maxéville.....	17 août 1864.	295	Société des mines du Luxembourg et des forges de Sarrebrück.
14	Croisette-Liverdun	21 juil. 1866.	372	Compagnies de Châtillon-Commentry et Neuves-Maisons.
15	Custines.....	16 août 1876. 17 août 1888.	201	Société des hauts-fourneaux et fonderies de Pont-à-Mousson.
16	Laxou.....	13 août 1867.	266	De Dietrich et Cie.
17	Lay-Saint-Christophe.....	21 déc. 1867.	223	Société des aciéries de Pompey.
18	Sainte-Geneviève.	14 mars 1868.	195	Durenne.
19	Fond-de-Monvaux.	10 fév. 1869.	382	Cie de Châtillon-Commentry et Neuves-Maisons.
20	Grande-Goutte...	10 fév. 1869.	239	Société des hauts-fourneaux et fonderies de Pont-à-Mousson.
21	Bois-du-Four.....	26 juin 1859. 3 janv. 1875.	233	J. Marcellot et Cie.
22	Le Montet.....	4 août 1869.	366	Société des aciéries de Pompey.
23	Fontaines-des-Roches.....	9 août 1870.	186	Simon, Lemut et Cie. Société de Denain et d'Anzin (amodiataire).
24	Saint-Jean.....	22 févr. 1872. 3 janv. 1875.	150	Société des forges de Champagne.
25	Malzéville.....	29 avril 1872.	282	Société des hauts-fourneaux et fonderies de Pont-à-Mousson.
26	Ludres.....	20 sep. 1876.	416	Société des aciéries de Pompey.
27	Bois de Flavémont.....	23 fév. 1874.	206	Société de Brousseval.
28	Haute-Lay.	29 mars 1874.	152	Société des forges de Champagne.
29	Eulmont.....	29 mars 1874.	236	Grosdidier fils et gendre.

Digitized by Google

NUMÉROS	DÉSIGNATION des concessions	DATES d'institution	SUPERFICIE	PROPRIÉTAIRES ou exploitants
			Hect.	
30	Maron-Val-de-Fer.	Val-de-Fer 23 avril 1874. 2 sep. 1874. 11 nov. 1875. Val-Fleurion : 23 avril 1874. Maron-Nord : 25 sep. 1874. 20 mars 1900. 28 déc. 1874.	1.604	Compagnie de Châtillon-Commentry et Neuves-Maisons.
31	Amance.....	13 avril 1893. 24 nov. 1896.	1.180	Société de Vezin-Aulnoye.
32	Sexey-aux-Forges	3 janv. 1875.	268	Société des forges de Champagne.
33	Sainte-Barbe.....	3 janv. 1875.	201	Société des forges de Champagne.
34	Bellefontaine.....	17 mai 1875.	532	Société des mines de Bellefontaine.
35	Lavaux.....	21 avril 1880.	370	Société des forges et aciéries du Nord et de l'Est.
36	Haye.....	1er juin 1882.	393	Société lorraine industrielle.
37	Marie-Chanois....	14 juin 1882.	212	Rozet, Simon et Lemut. Société de Denain et d'Anzin (amodiataire).
38	Millery.....	21 juin 1882. 15 avril 1885.	219	Société lorraine industrielle.
39	Chavenois.....	19 avril 1883.	450	Société des forges et fonderies de Montataire.
40	Faulx.....	19 avril 1883.	634	Société des aciéries de Pompey.
41	Malleloy.....	19 nov. 1885.	723	Société lorraine industrielle.
42	Côte-de-Sion.....	3 janv. 1887.	495	Cie de Châtillon-Commentry et Neuves-Maisons.
43	Vieux-Château...	17 août 1888.	153	Société des hauts-fourneaux et fonderies de Pont-à-Mousson.
44	Belleville.....	1er mai 1892.	369	Société des hauts-fourneaux et fonderies de Pont-à-Mousson.
45	Clévant.....	20 juil. 1894.	63	Société de Denain et d'Anzin.
46	Leyr.....	29 juil. 1899.	492	Société des forges et fonderies de Montataire.

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I.

Généralités.

Pages.

1. — Étendue et ressources du gisement..... 115
2. — Situation géographique et premier aperçu géologique..... 117
   Relief des terrains dans la partie septentrionale des gisements et caractères hydrographiques. — Relief et caractères hydrographiques de la région méridionale. — Consistance des morts terrains..... 117
3. — Choix des procédés d'extraction 121
   Nécessité des puits d'extraction. — Exploitation à ciel ouvert ou par galeries à flanc de coteau..... 121
4. — Altérations des couches aux affleurements..... 124
5. — Consistance de la formation ferrugineuse..... 125
   Sondage de Mars-la-Tour (DV). — Sondage de Moineville (AC). — Sondage de Mairy (BC). — Sondage de Briey (FL). — Sondage de Valleroy (Y)..... 126
6. — Délimitation des couches exploitables..... 129
   Minières d'Hussigny. — Terminologie usuelle pour la désignation des couches de minerais..... 130
7. — Nombre de couches exploitables..... 132
   Mine de Micheville. — Sondage de Pienne (CE)..... 132
8. — Epaisseur de la formation ferrugineuse. — Composition des minerais..... 134
9. — Aperçu paléontologique..... 135
   Toarcien supérieur. — Bajocien. — Bathonien. — Callovien..... 135

CHAPITRE II.

Théorie des failles nourricières.

1. — Revue rétrospective des travaux publiés sur le gisement.. 138
   Travaux de MM. Braconnier et Daubrée. — Travaux de M. Hoffmann, de M. Greven, de M. Kohlmann..... 139
2. — Ancienne théorie des affleurements..... 143

Digitized by Google

Pages.

Coïncidence des affleurements riches du Luxembourg avec la direction des principales failles 143
3. — Récurrence des actions de plissement..... 144
Plis synclinaux et anticlinaux dans les différents étages de la région ferrifère..... 145
4. — Division du gisement en bassins..... 146
5. — Nature et degré d'authenticité des documents utilisés dans cette étude..... 147
Recherches en territoire français. — Recherches en Lorraine allemande. — Région du Luxembourg..... 148
6. — Principes de la théorie des failles nourricières..... 150
7. — Premier cas : Dépôt lenticulaire sur soubassement horizontal. 153
8. — Deuxième cas : Formation des dépôts sur soubassements inclinés..... 156
9. — Troisième cas : Formation des dépôts sur soubassement rejeté 157

CHAPITRE III.

Bassin de Longwy.

1. — Subdivision occidentale..... 160
Mines de Lexy et de Mont-Saint-Martin..... 160
2. — Subdivision centrale..... 161
Mines de Saulnes et Herserange..... 161
3. — Subdivision orientale..... 162
Mines d'Hussigny et de Villerupt..... 162
4. — Failles nourricières du bassin..... 164
5. — Considérations générales sur les minerais du bassin de Longwy..... 169
6. — Historique rapide des travaux de recherches de 1883 à 1899. 170

CHAPITRE IV.

Bassin de Landres.

1. — Coupes longitudinale et transversale du bassin 173
Sondage d'Amermont (BW)..... 174
2. — Faille nourricière de Bonvillers. — Faille de Norroy-le-Sec. 176
3. — Couches accessoires dans le bassin de Landres..... 177
Couche noire de Xivry-Circourt. — Hypothèse d'une faille nourricière entre la vallée de la Pienne et la vallée de la Crusnes..... 177
4. — Région restant à explorer..... 181
Sondage de Ville-au-Montois (FB) et de Bazailles (FG).—

Digitized by Google

Pages.
Faille de Joppécourt 181
5. — Répartition du fer, du calcaire et de la silice dans les minerais du bassin de Landres 183
Partage du gisement en trois zones. — Couche grise des sondages DH, CE, EL, DB, CX et EP 183
6. — Réactions chimiques servant à expliquer la formation des deux zones exploitables 193
Zone des minerais calcaires. — Zone des minerais purs. — Phénomènes calorifiques attribuables à la décomposition du carbonate de fer 194
7. — Action des courants. — Sondage ET 197
8. — Contact à Murville du bassin de Landres avec le bassin de Tucquegnieux 199
9. — Terminaison du bassin de Landres dans sa région méridionale 201

CHAPITRE V.

Bassin d'Ottange-Tucquegnieux.

PREMIÈRE SECTION. — *Couche grise.*

1. — Faille d'Ottange-Audun-le-Roman, envisagée comme nourricière 203
Sondage de Ludelange (YU). — Sondage de Tressange (YV) 204
2. — Région occidentale du synclinal d'Ottange. — District d'Aumetz 206
3. — Région orientale du synclinal 207
4. — Région du Luxembourg 208
5. — Région septentrionale du synclinal de Tucquegnieux (Audun-le-Roman, Anderny) 210
6. — Région occidentale (Mairy-Tucquegnieux) 211
Sondage de Tucquegnieux (AW). — Sondage de Mainville (BF). — Profils entre Bonvillers et la Malmaison, entre Audun-le-Roman et Anoux 212
7. — Région pauvre d'Ozerailles 213
Sondages d'Anoux (BE), d'Ozerailles (E)Y, d'Immonville (BA) et de Lixières (EC) 214
8. — Région méridionale et orientale du synclinal de Tucquegnieux 215
(Trieux-Lommerange). — Failles de Neufchef, du Chevillon, d'Avril. — Anticlinal de Mancieulles-Anoux 216
9. — Région centrale du bassin. — Faille de Fontoy 218

Digitized by Google

DEUXIÈME SECTION. — *Couches accessoires.*

Pages.

1. — Couches noires à l'Est de la faille de Crusnes. — Faille de Crusnes 224
Sondage d'Havange (YX) 227
2. — Couches inférieures au Sud de la faille d'Audun-le-Roman.. 228
3. — Couches inférieures au Nord de la faille d'Avril 229
4. — Couche jaune de la faille d'Ottange (région de Rumelange, Tetange, en Luxembourg) 230
5. — Couche jaune d'Avril 232
6. — Couche rouge de la région d'Esch 233
7. — Couche rouge d'Audun-le-Roman et de Bonvillers 235
8. — Couche rouge d'Anoux et du Chevillon 238

TROISIÈME SECTION.

Recherches infructueuses de 1882-1883 dans la région d'Avril-Trieux-Sancy 239
Sondages de Sancy (1882); de Saint-Pierremont (1883); d'Avril (1883); du Fond Gravin (1883) 239

CHAPITRE VI.

Bassin de l'Orne.

PREMIÈRE SECTION. — *Couche grise.*

1. — Failles nourricières du bassin 247
Failles de l'Orne, de Rombas, de Neufchef, d'Avril, du Woigot, de Sainte-Marie 248
2. — Digression sur le bassin de Saint-Privat-Novéant. — Failles de Roncourt, de Flavigny-Montigny. — Mines de la région d'Ars-sur-Moselle (vallée de la Mance) 250
3. — Coupe longitudinale du bassni de l'Orne 253
Synclinal de Brainville 253
4. — Région de Moyeuvre-Neufchef 254
Coupe au point XV de la mine d'Hayange 255
5. — Région d'Avril-Briey 255
6. — Région méridionale du bassin 256
7. — Région occidentale 258
8. — Région de Génaville 258

DEUXIÈME SECTION. — *Couches accessoire*

1. — Couches inférieures 260
2. — Couche jaune. — Régions de Montois, d'Homécourt, de Briey-Valleroy et d'Avril 262
3. — Couche rouge. — Régions de Jœuf-Homécourt et de Briey. 264

Digitized by Google

CHAPITRE VII.

Considérations générales sur la composition des minerais et leur genèse.

Pages.
1. — Silice et alumine contenues dans les minerais 267
Théorie de la genèse par substitution de substances (épigénie, métasomatose)..... 268
2. — Carbonates contenus dans le minerai..... 274

CHAPITRE VIII.

Le phosphore dans les minerais oolithiques.

Minerais du Luxembourg. — Sondages de Landres (DG), de Pienne (CE), de Bouligny (CQ), de Bouvigny (EB)..... 281
Scories de déphosphoration..... 285

CHAPITRE IX.

Résumé et conclusions 287

ANNEXES.

A_1. — Sondage de Joudreville (CB). — Coupe de tous les terrains traversés.
A_2. — Coupe de la formation ferrugineuse du sondage CB.
A_3. — Renseignements divers relatifs au sondage CB.
A_4. — Coupe résumée du sondage CB.
A_5. — Tableau des résultats fournis par les recherches exécutées dans la région française.
A_6. — Renseignements sur l'altitude des couches dans la région allemande.
A_7. — Nomenclature des concessions de mines de fer du département de Meurthe-et-Moselle.

PLANCHES.

Pl. V. — Carte d'ensemble du gisement de minerai de fer oolithique de la Lorraine donnant la délimitation des couches exploitables, la topographie de la couche grise, l'emplacement des sondages, les limites des concessions françaises, etc.
Pl. VI. — Carte du bassin de Landres donnant la répartition des minerais en différentes zones.

Digitized by Google

Pl. VII. — Coupes d'ensemble (I et II) du gisement en Lorraine allemande.
Pl. VIII. — Coupes de sondages en Lorraine allemande.
Pl. IX. — Coupe d'ensemble (XII) dans le grand-duché de Luxembourg.
Pl. X. — Coupes de sondages dans la région française.
Pl. XI. — Coupes d'ensemble de la couche grise (III, IV, V, VI et VII) des bassins de Landres et de Tucquegnieux.
Pl. XII. — Coupes d'ensemble de la couche grise (VIII, IX, X) du bassin de l'Orne.

Digitized by Google

TABLEAUX COMPARATIFS DE LA PRODUCTION DES COMBUSTIBLES MINÉRAUX DES FONTES, FERS ET ACIERS, EN 1900 ET EN 1901 (1).

I. — Combustibles minéraux.

PRODUCTION PAR DÉPARTEMENT.

DÉPARTEMENTS	NATURE DU COMBUSTIBLE	PRODUITS 1900	PRODUITS 1901
		tonnes	tonnes
Ain	Lignite	»	350
Allier	Houille	863.870	865.722
Alpes (Basses-)	Lignite	57.159	61.664
Alpes (Hautes-)	Anthracites	11.339	12.280
Ardèche	Houille et anthracite	62.795	62.317
	Lignite	»	132
Aveyron	Houille	1.031.034	1.038.978
	Lignite	5.669	6.241
Bouches-du-Rhône	Idem	563.704	566.552
Cantal	Houille	113.507	99.618
Corrèze	Idem	687	1.271
Corse	Anthracite	100	98
Côte-d'Or	Houille et anthracite	1.820	4.459
Creuse	Houille	181.407	171.419
Dordogne	Idem	»	2.517
	Lignite	2.950	1.950
Drôme	Idem	1.352	780
Gard	Houille	1.982.364	1.958.476
	Lignite	25.840	24.087
Hérault	Houille et anthracite	234.944	231.192
	Lignite	80	»
Isère	Anthracite	281.068	336.248
	Lignite	287	446
Landes	Idem	702	3.052
Loire	Houille et anthracite	3.951.022	3.795.921
Loire (Haute-)	Houille	252.437	245.186
Loire-Inférieure	Anthracite	21.440	22.229
Lot	Houille	3.824	2.260
Maine-et-Loire	Anthracite	15.204	13.736
Mayenne	Idem	39.956	34.620
Nièvre	Houille	176.941	153.893
Nord	Houille et anthracite	5.669.518	5.334.310
Pas-de-Calais	Houille	14.594.575	14.325.195
Puy-de-Dôme	Houille et anthracite	444.561	432.809
Pyrénées-Orientales	Lignite	2.439	3.068
Rhône	Houille	31.850	26.654
Saône (Haute-)	Idem	244.834	232.596
	Lignite	9.445	11.857
Saône-et-Loire	Houille et anthracite	1.775.986	1.347.352
Savoie	Anthracite	19.313	25.574
	Lignite	5.056	»
Savoie (Haute-)	Anthracite	916	700
Sèvres (Deux-)	Houille	19.165	17.161
Tarn	Idem	665.238	786.146
Var	Idem	»	150
Vaucluse	Lignite	2.903	2.737
Vendée	Houille	29.847	31.949
Vosges	Lignite	5.072	5.723
Yonne	Idem	78	82
Récapitulation	Houille et anthracite	32.721.562	31.613.036
	Lignite	682.736	688.721
Totaux		33.404.298	32.301.757
Diminution			1.102.541

(1) Ces tableaux ont été publiés, par ordre de M. le Ministre des Travaux publics, au *Journal officiel* (numéros du 24 février et du 24 mars 1902). Les chiffres concernant l'année 1901 sont extraits des états *semestriels* fournis par les ingénieurs des mines et, par suite, *provisoires;* tandis que la statistique de 1900, résultant du dépouillement des états *annuels*, contient des chiffres *définitifs*.

Digitized by Google

PRODUCTION PAR BASSIN.

GROUPES GÉOGRAPHIQUES DE BASSINS	PRODUITS 1900 tonnes	PRODUITS 1901 tonnes	BASSINS ÉLÉMENTAIRES (*)	DÉPARTEMENTS OU LES BASSINS SONT SITUÉS	PRODUITS 1900 tonnes	PRODUITS 1901 tonnes
I. — Houille et Anthracite.						
Nord et Pas-de-Calais	20.264.093	19.669.505	Valenciennes	Pas-de-Calais, Nord	20.263.348	19.668.550
			Le Boulonnais (Hardinghen)	Pas-de-Calais	745	955
Loire	4.021.627	3.867.588	Saint-Etienne (et Rive-de-Gier)	Loire, Rhône	3.947.673	3.794.913
			Communay	Isère	38.755	45.013
			Sainte-Foy-l'Argentière	Rhône	31.175	26.534
			Le Roannais (Roanne)	Loire, *Rhône*	4.024	1.128
Gard	2.045.159	2.020.793	Alais	Gard, Ardèche	1.997.221	1.973.297
			Aubenas	Ardèche	38.195	38.350
			Le Vigan	Gard	9.743	9.146
Tarn et Aveyron	1.700.096	1.827.384	Aubin	Aveyron	1.013.911	1.022.892
			Carmaux et Albi	Tarn	665.238	786.146
			Rodez	Aveyron	17.123	16.086
			Saint-Perdoux	Lot	3.824	2.260
Bourgogne et Nivernais	2.010.327	1.551.225	Creusot et Blanzy	Saône-et-Loire	1.578.418	1.150.736
			Decize	Nièvre	176.941	153.893
			Epinac et *Aubigny-la-Ronce*	Saône-et-Loire, *Côte-d'Or*	116.729	125.517
			La Chapelle-sous-Dun	Saône-et-Loire	80.839	71.099
			Bert	Allier	55.580	45.521
			Sincey, *Forges*	Côte-d'Or, *Saône-et-Loire*	1.820	4.459
Bourbonnais	1.093.544	1.087.534	Commentry (et Doyet)	Allier	720.087	723.701
			Saint-Eloy	Puy-de-Dôme	285.254	267.333
			L'Aumance (Buxière-la-Grue)	Allier	86.976	96.500
			La Queune (Fins et Noyant)	Allier	1.227	»
Auvergne	525.251	510.280	Brassac	Haute-Loire, Puy-de-Dôme	336.110	340.230
			Champagnac et Bourg-Lastic	Cantal, Puy-de-Dôme	160.653	144.256
			Langeac	Haute-Loire	28.488	25.794
Alpes occidentales	273.881	319.780	Le Drac (La Mure)	Isère	242.301	280.937
			Maurienne-Tarentaise et Briançon	Hautes-Alpes, Savoie	30.652	37.854
			Chablais et Faucigny	Haute-Savoie	916	700
			Oisans et *le Grésivaudan*	Isère	12	298
Vosges méridionales	244.834	232.596	Ronchamp	Haute-Saône	244.834	232.596
Hérault	234.944	231.192	Graissessac, *Roujan*	Hérault	234.944	231.192

Digitized by Google

Creuse et Corrèze	182.094	175.207	Ahun	Creuse	167.003	151.289
			Bourganeuf	Creuse	14.404	20.130
			Meymac et Argentat, *Cublac (Terrasson)*	Corrèze, Dordogne	687	3.788
Ouest	125.612	119.695	Vouvant et Chantonnay	Deux-Sèvres, Vendée	49.012	49.110
			Basse-Loire	Loire-Inférieure, Maine-et-Loire	36.644	35.965
			Le Maine	Mayenne, *Sarthe*	39.956	34.620
			Le Cotentin (le Plessis)	*Manche*	»	»
			Saint-Pierre-la-Cour	*Mayenne*	»	»
Les Maures	»	150	Les Maures (Fréjus)	Var, *Alpes-Maritimes*	»	150
Corse	100	98	Osani	Corse	100	98
Les Pyrénées	»	»	*Ibantelly, Durban et Ségure*	*Basses-Pyrénées, Aude*	»	»
Totaux pour les houilles	32.721.562	31.613.036			32.721.562	31.613.036

II. — Lignite.

Provence	620.863	628.216	Fuveau (Aix)	Bouches-du-Rhône, Var	563.704	566.552
			Manosque	Basses-Alpes, *Vaucluse*	57.159	61.664
			La Cadière	*Var*	»	»
Comtat	28.078	25.839	Bagnols, Orange, *Banc-Rouge, Vagnas*	Gard, Vaucluse, *Ardèche*	19.506	18.495
			Barjac et Célas	Gard	7.185	6.054
			Méthamis	Vaucluse	1.387	1.290
			Montoulieu	*Hérault*	»	»
Vosges méridionales	14.517	17.580	Gouhenans, *Gémonval*	Haute-Saône	9.445	11.857
			Norroy	Vosges	5.072	5.723
Sud-Ouest	12.605	15.428	Millau et Trévezel	Aveyron, Gard	6.334	7.358
			Estavar	Pyrénées-Orientales	2.439	3.068
			Saint-Lon, Larquier, *Orignac*	Landes, *Hautes-Pyrénées*	702	3.052
			Le Sarladais	Dordogne	2.950	1.950
			La Caunette	Hérault, *Aude*	80	»
			Murat	*Cantal*	»	»
Haut-Rhône	6.695	1.576	Hauterives, *Montélimar*	Drôme	1.352	780
			La Tour-du-Pin	Isère	287	446
			Douvres, *Vercia*	Ain, *Jura*	»	350
			Chambéry et *Entrevernes*	Savoie, *Haute-Savoie*	5.056	»
Yonne	78	82	Joigny	Yonne	78	82
Totaux pour les lignites	682.736	688.721			682.736	688.721
Totaux généraux	33.404.298	32.301.757			33.404.298	32.301.757

(*) Les bassins dont les mines n'ont pas été exploitées, ainsi que les départements correspondants, ont leurs noms en *italiques*.

Digitized by Google

II. -- Industrie sidérurgique.

PRODUCTION DES FONTES.

DÉPARTEMENTS	DÉSIGNATION de LA FONTE suivant la nature du combustible	1900 — FONTES d'affinage	1900 — FONTES de moulage et moulée en 1re fusion	1900 — PRODUCTION totale	1901 — FONTES d'affinage	1901 — FONTES de moulage et moulée en 1re fusion	1901 — PRODUCTION totale
		tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes
Allier	Au coke	18.606	10.437	29.043	16.390	10.857	27.247
Ardèche	Au coke	23.916	»	23.916	10.307	5.412	15.719
Ariège	Au coke	27.455	»	27.455	24.306	»	24.306
Aveyron	Au coke	24.468	»	24.468	17.167	»	17.167
Bouches-du-Rhône	Au coke	21.170	866	22.036	17.282	6.734	24.016
Calvados	Au coke	»	»	»	680	»	680
Charente	Au bois	»	500	500	»	500	500
Cher	Mixte	»	14.921	14.921	»	10.509	10.509
Dordogne	Au bois	150	600	750	»	560	560
Gard	Au coke	70.139	4.556	74.695	65.144	3.455	68.599
Gironde	Au coke	»	»	»	14.800	4.200	19.000
Isère	Au coke	34.753	176	34.929	32.894	2.168	35.062
Landes	Au coke	69.634	2.420	77.904	70.653	1.652	78.863
	Au bois	2.750	3.370		3.558	3.000	
Loire	Au coke	19.996	»	19.996	17.394	»	17.394
Loire-Inférieure	Au coke	59.762	9.841	69.603	54.628	5.669	60.297
Lot-et-Garonne	Au coke	241	26.004	26.245	867	29.577	30.444
Marne (Haute-)	Au coke	27.355	25.908	56.139	32.220	12.656	50.192
	Au bois	1.410	686		1.684	2.693	
	Mixte	»	780		»	939	
Meurthe-et-Moselle	Au coke	1.241.728	428.166	1.669.894	963.110	481.745	1.444.855
Nord	Au coke	312.674	»	312.674	266.570	»	266.570
Pas-de-Calais	Au coke	91.928	8.345	100.273	77.601	7.360	84.961
Pyrénées-Orientales	Au bois	3.890	»	3.890	6.178	»	6.178
Rhône	Au coke	26.182	3.732	29.914	16.528	1.673	18.201
Saône (Haute-)	Au bois	1.575	55	1.630	1.136	32	1.168
Saône-et-Loire	Au coke	81.968	2.810	84.778	88.673	2.577	91.250
Tarn	Au coke	5.025	3.620	8.645	3.845	2.657	6.502

Digitized by Google

RÉCAPITULATION.

Fonte	Au coke	2.156.730	526.881	2.683.611	1.791.059	578.392	2.369.451
	Au bois	9.775	5.211	14.986	12.556	6.785	19.341
	Mixte	»	15.701	15.701	»	11.448	11.448
	Totaux	2.166.505	547.793	2.714.298	1.803.615	596.625	2.400.240
	Augmentation				»	48.832	»
	Diminutions				362.890	»	314.058

PRODUCTION DES FERS.

DÉPARTEMENTS	MODE DE FABRICATION DU FER	1900				1901			
		RAILS	FERS marchands et spéciaux	TÔLES	PRODUCTION totale	RAILS	FERS marchands et spéciaux	TÔLES	PRODUCTION totale
		tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes
Allier	Puddlage	72	12.098	3.351	15.521	57	11.910	4.092	16.059
Ardennes	Puddlage	»	46.595	7.227	82.738	»	34.014	7.238	64.504
	Affinage au charbon de bois	»	»	»		»	71	»	
	Réchauffage de vieux fers et riblons	»	25.866	3.050		»	20.915	2.266	
Ariège	Puddlage	»	7.701	»	7.701	»	10.832	»	12.598
	Réchauffage de vieux fers et riblons	»	»	»		»	1.766	»	
Aube	Puddlage	»	3.457	»	5.706	»	1.449	»	4.612
	Réchauffage de vieux fers	»	2.249	»		»	3.163	»	
Aveyron	Puddlage	»	5.238	285	9.173	»	5.047	184	8.060
	Réchauffage de vieux fers et riblons	»	3.220	430		»	2.621	208	
Bouches-du-Rhône	Puddlage	»	»	»	2.945	»	114	»	2.162
	Réchauffage de vieux fers et riblons	»	2.945	»		»	2.048	»	
Côte-d'Or	Puddlage	»	3.828	»	5.841	»	2.978	»	4.665
	Réchauffage de vieux fers	»	1.139	874		»	845	842	
Côtes-du-Nord	Réchauffage de vieux fers	»	3.542	»	3.542	»	1.599	»	
Dordogne	Puddlage	»	450	»	4.400	»	280	»	1.599
	Affinage au charbon de bois	»	450	»		»	190	»	
	Réchauffage de vieux fers	»	3.500	»		»	2.650	»	3.120

Digitized by Google

PRODUCTION DES FERS (*suite*).

DÉPARTEMENTS	MODE DE FABRICATION DU FER	1900				1901			
		RAILS	FERS marchands et spéciaux	TÔLES	PRODUCTION totale	RAILS	FERS marchands et spéciaux	TÔLES	PRODUCTION totale
		tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes
Doubs	Puddlage	»	»	»	8.220	»	2.660	»	5.361
	Affinage au charbon de bois	»	2.001	1.023		»	1.072	881	
	Réchauffage de vieux fers	»	4.971	225		»	694	46	
Eure	Réchauffage de vieux fers	»	6.644	»	6.644	»	6.480	»	6.480
Gard	Puddlage	»	5.048	»	5.048	»	3.603	»	3.603
Garonne (Haute-)	Réchauffage de vieux fers et riblons	»	2.736	»	2.736	»	2.587	»	2.587
Ille-et-Vilaine	Réchauffage de vieux fers	»	82	»	82	»	71	»	71
Isère	Puddlage	»	28	»	2.781	»	70	»	2.322
	Réchauffage de vieux fers	»	2.753	»		»	2.252	»	
Jura	Puddlage	»	5.858	1.505	15.989	»	5.972	1.915	14.166
	Réchauffage de vieux fers	»	6.189	2.437		»	3.606	2.673	
Landes	Puddlage	»	1.000	»	2.435	»	651	»	1.526
	Affinage au charbon de bois	»	1.100	»		»	875	»	
	Réchauffage de vieux fers	»	335	»		»	»	»	
Loire	Puddlage	»	18.848	3.779	30.222	»	40.375	2.138	17.298
	Réchauffage de vieux fers et riblons	»	7.595	»		»	4.785	»	
Loire-Inférieure	Puddlage	»	1.509	»	8.174	»	1.365	»	5.616
	Réchauffage de vieux fers et riblons	»	6.665	»		»	4.251	»	
Marne (Haute-)	Puddlage	»	50.423	1.378	65.836	»	43.542	1.468	57.206
	Affinage au charbon de bois	»	»	»		»	»	1.108	
	Réchauffage de vieux fers et riblons	»	12.626	1.409		»	9.693	1.395	
Meurthe-et-Moselle	Puddlage	»	33.012	360	37.643	»	25.334	190	20.171
	Réchauffage de vieux fers	»	4.266	»		»	3.647	»	
Meuse	Puddlage	»	7.648	»	9.346	»	5.683	»	6.538
	Réchauffage de vieux fers	»	1.698	»		»	855	»	
Nièvre	Puddlage	»	1.508	59	2.135	»	1.617	10	2.045
	Affinage au charbon de bois	»	388	15		»	108	69	
	Réchauffage de vieux fers et riblons	»	165	»		»	229	12	
Nord	Puddlage	423	131.770	36.607	290.469	258	123.500	23.100	217.173
	Réchauffage de vieux fers et riblons	132	120.601	1.033		»	69.600	715	
Oise	Puddlage	»	4.563	»	4.563	»	»	»	»

Digitized by Google

Pyrénées-Orientales	Affinage au charbon de bois (foyers catalans)	»	96	»	103	»	33	»	33
	Réchauffage de vieux fers	»	7	»		»	»	»	
Rhin (Haut-) (Territoire de Belfort)	Puddlage	»	»	»	873	»	7	»	208
	Affinage au charbon de bois	»	873	»		»	201	»	
Saône (Haute-)	Affinage au charbon de bois	»	»	198	198	»	»	153	153
Saône-et-Loire	Puddlage	»	16.940	541	25.951	»	22.508	465	22.973
	Réchauffage de vieux fers	»	8.470	»		»	»	»	
Sarthe	Réchauffage de vieux fers	»	15	»	15	»	14	»	14
Savoie	Puddlage	»	»	»	42	»	27	»	33
	Affinage au charbon de bois	»	42	»		»	»	»	
	Réchauffage de vieux fers	»	»	»		»	6	»	
Savoie (Haute-)	Réchauffage de vieux fers et riblons	»	1.330	782	2.112	»	1.300	745	2.045
Seine	Réchauffage de vieux fers	»	39.099	»	39.099	»	31.254	»	31.254
Seine-Inférieure	Réchauffage de vieux fers	»	44	»	44	»	69	»	69
Seine-et-Oise	Réchauffage de vieux fers	»	3.725	»	3.725	»	3.749	»	3.749
Somme	Puddlage	»	820	»	2.497	»	900	»	2.445
	Réchauffage de vieux fers et riblons	»	1.677	»		»	1.545	»	
Tarn	Puddlage	»	2.125	»	3.435	»	1.950	»	2.546
	Réchauffage de vieux fers et riblons	»	1.310	»		»	596	»	
Vosges	Réchauffage de vieux fers	»	164	126	290	»	92	153	245

RÉCAPITULATION.

Fer	Puddlé	495	360.472	55.092	416.059	315	316.397	40.800	357.512
	Affiné au charbon de bois	»	4.957	1.236	6.193	»	2.550	2.211	4.761
	Obtenu par réchauffage de vieux fers et riblons	132	275.524	10.366	286.022	»	182.981	9.055	192.036
	Totaux	627	640.953	66.694	708.274	315	501.928	52.066	554.309
	Diminutions					312	139.025	14.628	153.965

Observation. — Les fers bruts ou massiaux transformés en produits marchands dans des départements autres que ceux où ils ont été fabriqués ne figurent pas sur le tableau, afin d'éviter un double emploi.

Digitized by Google

PRODUCTION DES ACIERS.

DÉPARTEMENTS	MODE DE FABRICATION DE L'ACIER	1900					1901				
		PRODUCTION DES ACIERS OUVRÉS				PRODUCTION des lingots Bessemer et Siemens-Martin	PRODUCTION DES ACIERS OUVRÉS				PRODUCTION des lingots Bessemer et Siemens-Martin
		Rails	Aciers marchands	Tôles	PRODUCTION totale		Rails	Aciers marchands	Tôles	PRODUCTION totale	
		tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes
Aisne	Fusion au foyer Bessemer	»	»	906	906	»	»	»	680	680	»
Allier	Fusion au four Siemens-Martin	216	26.257	5.932	33.715	23.700	»	45.704	3.279	49.843	54.856
	Puddlage	»	50	»		»	»	50	»		»
	Cémentation	»	60	»		»	»	60	»		»
	Fusion au creuset	»	1.200	»		»	»	750	»		»
Ardennes	Fusion au foyer Bessemer	»	20.024	13.407	47.413	»	»	11.674	11.156	41.519	»
	Fusion au four Siemens-Martin	»	4.602	8.586		19.455	»	9.338	7.818		17.305
	Cémentation	»	8	»		»	»	10	»		»
	Fusion au creuset	»	786	»		»	»	680	»		»
	Réchauffage de vieil acier	»	»	»		»	»	110	733		»
Ariège	Fusion au four Siemens-Martin	»	3.643	»	4.281	6.222	»	3.543	»	3.811	4.821
	Puddlage	»	587	»		»	»	229	»		»
	Cémentation	»	22	»		»	»	20	»		»
	Fusion au creuset	»	29	»		»	»	19	»		»
Aube	Fusion au foyer Bessemer	»	150	»	150	»	»	487	»	487	»
Aveyron	Fusion au four Siemens-Martin	542	13.185	823	14.550	19.196	806	13.072	601	14.479	18.336
Bouches-d.-Rhône	Fusion au foyer Bessemer	»	600	»	600	»	»	512	»	512	»
Charente	Fusion au four Siemens-Martin	»	242	»	242	»	»	259	»	259	»
Côte-d'Or	Fusion au foyer Bessemer	»	8.197	1.295	9.672	»	»	13.964	510	15.139	»
	Fusion au four Siemens-Martin	»	»	»		»	»	»	209		»
	Puddlage	»	»	»		»	»	38	»		»
	Cémentation	»	80	»		»	»	»	»		»
	Fusion au creuset	»	100	»		»	»	400	»		»
	Réchauffage de vieil acier	»	»	»		»	»	18	»		»
Doubs	Fusion au foyer Bessemer	»	1.235	394	5.030	»	»	334	116	2.097	»
	Fusion au four Siemens-Martin	»	2.672	729		6.350	»	510	1.137		3.323
Gard	Fusion au foyer Bessemer	27.320	12.687	»	53.500	51.174	30.901	115	»	59.471	37.188
	Fusion au four Siemens-Martin	5.506	7.818	»		16.504	17.892	10.374	»		33.945
	Réchauffage de vieil acier	»	169	»		»	»	159	»		»

Digitized by Google

Indre-et-Loire	Cémentation	»	98	»	98	»	»	»	»	»	»
	Fusion au four Siemens-Martin	»	4.831	»		8.017	»	3.229	»		6.812
Isère	Puddlage	»	366	»	6.099	»	»	428	»	4.178	»
	Cémentation	»	240	»		»	»	245	»		»
	Fusion au creuset	»	062	»		»	»	276	»		»
Jura	Fusion au four Siemens-Martin	»	5.394	5.513	10.907	8.724	»	4.666	6.046	10.655	8.081
Landes	Fusion au foyer Bessemer	27.500	12.950	»	49.382	46.000	33.003	8.300	»	48.463	44.958
	Fusion au four Siemens-Martin	»	8.932	»		9.800	»	7.160	»		10.623
	Fusion au foyer Bessemer	»	5.033	»		»	»	»	»		»
Loire	Fusion au four Siemens-Martin	205	42.618	24.612	88.278	106.977	128	28.036	22.152	67.507	84.187
	Puddlage, affinage au charbon de bois	»	2.139	»		»	»	2.343	»		»
	Cémentation	»	455	»		»	»	417	19		»
	Fusion au creuset	»	11.177	427		»	»	8.659	78		»
	Réchauffage de vieil acier	»	1.592	20		»	»	5.656	19		»
Loire-Inférieure	Fusion au foyer Bessemer	24.668	1.190	2.190	68.360	33.227	14.348	»	490	63.703	16.417
	Fusion au four Siemens-Martin	»	16.153	24.159		55.997	3.511	14.813	30.541		61.999
Marne (Haute-)	Fusion au foyer Bessemer	»	10.291	6.047	31.965	787	»	441	5.410	15.928	663
	Fusion au four Siemens-Martin	»	15.627	»		21.297	»	10.077	»		20.785
Meurthe-et-Moselle	Fusion au foyer Bessemer (procédé Thomas)	84.757	153.671	20.329	271.405	566.993	119.873	132.362	18.159	282.127	535.160
	Fusion au four Siemens-Martin	155	4.711	5.727		19.633	»	5.392	6.077		18.815
	Puddlage	»	965	850		»	»	170	154		»
	Réchauffage de vieil acier	»	70	170		»	»	»	»		»
Meuse	Fusion au foyer Bessemer (procédé Thomas)	»	3.198	»	15.038	2.500	»	2.379	»	13.854	2.440
	Fusion au four Siemens-Martin	»	11.840	»		12.845	»	11.475	»		12.493
Morbihan	Fusion au four Siemens-Martin	»	»	19.245	19.245	27.135	»	»	17.303	17.303	25.559
Nièvre	Fusion au four Siemens-Martin	612	19.848	696	23.203	25.897	1.947	16.801	508	19.273	21.328
	Puddlage	»	21	»		»	»	6	»		»
	Fusion au creuset	»	36	»		»	»	11	»		»
	Réchauffage de vieil acier	»	1.673	317		»	»	»	»		»
Nord	Fusion au foyer Bessemer	55.475	59.551	14.229	239.798	79.440	44.000	51.402	13.700	226.602	118.700
	Fusion au four Siemens-Martin	»	46.507	63.739		144.768	»	42.500	75.000		111.360
	Fusion au creuset	»	297	»		»	»	»	»		»
Oise	Fusion au foyer Bessemer	»	13.226	»	36.603	»	»	11.871	9.619	30.178	»
	Fusion au four Siemens-Martin	»	8.891	14.486		19.916	»	3.630	5.058		13.017
Pas-de-Calais	Fusion au foyer Bessemer	49.833	17.483	»	79.172	82.329	28.289	12.370	»	55.667	50.390
	Fusion au four Siemens-Martin	»	11.856	»		14.496	»	15.008	»		18.305
Rhin (Haut-) (Territoire de Belfort)	Fusion au four Siemens-Martin	»	1.569	»	1.569	5.350	»	3.076	»	3.076	4.018
Saône (Haute-)	Fusion au foyer Bessemer	»	»	1.550	1.550	»	»	»	1.375	1.375	»
Saône-et-Loire	Fusion au foyer Bessemer	1.405	35.516	7.392	96.235	52.133	1.733	28.267	13.283	85.978	54.514
	Fusion au four Siemens-Martin	»	21.074	30.848		73.602	»	21.703	20.992		54.678
Savoie	Fusion au four Siemens-Martin	»	202	»	202	»	»	100	»	100	»
Savoie (Haute-)	Fusion au foyer Bessemer	»	466	»	466	»	»	478	»	478	»
Seine	Fusion au foyer Bessemer	»	2.644	»	5.711	1.600	»	1.534	»	8.184	»
	Fusion au four Siemens-Martin	»	3.053	»		»	»	6.606	»		»
	Cémentation	»	1	»		»	»	»	»		»
	Fusion au creuset	»	13	»		»	»	44	»		»

Digitized by Google

PRODUCTION DES ACIERS (*suite*).

DÉPARTEMENTS	MODE DE FABRICATION DE L'ACIER	1900 — PRODUCTION DES ACIERS OUVRÉS — Rails	1900 — Aciers marchands	1900 — Tôles	1900 — PRODUCTION totale	1900 — PRODUCTION des lingots Bessemer et Siemens-Martin	1901 — PRODUCTION DES ACIERS OUVRÉS — Rails	1901 — Aciers marchands	1901 — Tôles	1901 — PRODUCTION totale	1901 — PRODUCTION des lingots Bessemer et Siemens-Martin
		tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes
Seine-Inférieure	Fusion au foyer Bessemer	»	2.600	»	2.600	3.100	»	1.086	»	1.086	»
Tarn	Puddlage	»	1.735	»	4.226	»	»	1.734	»	3.756	»
	Cémentation	»	191	»		»	»	168	»		»
Vosges	Fusion au creuset	»	2.300	»	4.366	»	»	1.854	»	3.402	»
	Fusion au foyer Bessemer	»	2.018	877		»	»	1.083	994		»
	Réchauffage de vieil acier	»	»	1.471		»	»	178	1.147		»

RÉCAPITULATION.

		Rails	Aciers marchands	Tôles	Production totale	Lingots Bessemer et Siemens-Martin	Rails	Aciers marchands	Tôles	Production totale	Lingots Bessemer et Siemens-Martin
Acier	Fondu au foyer Bessemer	270.958	362.730	68.616	702.304	919.283	272.147	280.803	75.492	628.442	860.425
	Fondu au four Siemens-Martin	7.236	281.525	205.095	493.856	645.881	24.284	274.841	196.721	495.846	604.646
	Puddlé et de forge	»	5.863	850	6.713	»	»	4.998	154	5.152	»
	Cémenté	»	1.155	»	1.155	»	»	920	19	939	»
	Fondu au creuset	»	16.600	427	17.027	»	»	12.693	78	12.771	»
	Obtenu par réchauffage de vieil acier	»	3.504	1.978	5.482	»	»	6.121	1.899	8.020	»
	Totaux	278.194	671.377	276.966	1.226.537	1.565.164	296.431	580.376	274.363	1.151.170	1.465.071
	Augmentation						18.237	»	»	»	»
	Diminutions						»	91.001	2.603	75.367	100.093

La production des lingots ne correspond pas entièrement à celle des aciers ouvrés Bessemer et Martin, car il y a lieu de tenir compte des variations du stock.

Digitized by Google

BULLETIN.

RENDEMENT COMPARÉ DES MACHINES A VAPEUR ET DES MOTEURS A GAZ.

M. Aimé Witz a publié, sous ce titre, dans *l'Éclairage électrique* (numéros des 4 et 11 janvier 1902), une comparaison intéressante des résultats obtenus dans les essais de machines à vapeur et de moteurs à gaz. Outre l'intérêt qui résulte de la comparaison de ces documents, ils sont en eux-mêmes assez nombreux et assez détaillés pour être, dans bien des cas, consultés avec fruit.

En ce qui concerne les chaudières, les meilleures utilisations qu'a constatées M. Witz sont de 70 à 75,5 p. 100 des calories disponibles dans la houille; il regarde une utilisation de 60 p. 100 comme très bonne en pratique courante.

Pour les machines à vapeur, le rendement thermique s'obtient en rapprochant le nombre des calories contenues dans la vapeur dépensée pour produire 1 cheval-heure, du nombre des calories (637) équivalentes à ce cheval-heure. Toutefois les calories contenues dans la vapeur semblent calculées en comptant la chaleur totale à partir du zéro centigrade, c'est-à-dire à partir d'une origine arbitraire qui ne correspond pas aux conditions réelles, puisque la chaudière reçoit l'eau à une température notablement supérieure (*).

Dans les exemples cités, on trouve des rendements thermiques qui atteignent le maximum de 19 p. 100 (rendement rapporté à la puissance indiquée) et qui sont généralement beaucoup moindres. Ce maximum est atteint par une machine à vapeur surchauffée.

En prenant l'ensemble constitué par la chaudière et la machine,

(*) Consulter, sur la définition du rendement thermique, les règles proposées par les *Civil Engineers* de Londres (*Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*, octobre 1898, p. 1349) et de l'*American Society of mechanical Engineers* (*Revue de Mécanique*, août 1901 p. 178). Toutefois les règles manquent de clarté en ce qui concerne ce point particulier, telles qu'elles sont données dans cette publication.

Digitized by Google

on trouve un rendement thermique maximum qui ne dépasse guère 14 p. 100, et qui, en pratique courante, pour de très bonnes machines, n'est plus que de 9 p. 100.

Les gazogènes sont supérieurs aux chaudières, car, dans les exemples cités, le pouvoir calorifique des gaz qu'ils fournissent atteint 80 à 84 p. 100 du pouvoir calorifique du combustible employé, et 62,9 p. 100 en marche prolongée.

Pour les moteurs à gaz, on a constaté des rendements thermiques de 30,6 p. 100 en travail indiqué et de 27 p. 100 en travail effectif; en marche courante, on obtient des rendements thermiques, en travail effectif, de 17,3 p. 100.

On voit qu'en combinant le meilleur gazogène avec le meilleur moteur, on obtiendrait un rendement total de 26,5 p. 100, en travail indiqué, et de 22 p. 100 en travail effectif. M. Witz cite, en terminant, des exemples de très faibles consommations de combustible réalisées en marche courante.

E. Sauvage.

Digitized by Google

DISCOURS
PRONONCÉS AUX FUNÉRAILLES
DE M. ALFRED CORNU

MEMBRE DE L'INSTITUT, INGÉNIEUR EN CHEF DES MINES

le 16 avril 1902.

DISCOURS DE M. MASCART

Membre de l'Institut,

AU NOM DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES.

Messieurs,

Ce n'est pas à moi, suivant le cours naturel des choses, que devait un jour incomber la cruelle mission d'accompagner vers la tombe notre éminent confrère, et de rendre hommage à sa mémoire au nom de la section de physique de l'Académie des Sciences.

M. Cornu avait conquis la plus haute situation scientifique, consacrée par les suffrages des académies du monde entier; il paraissait jouir d'une santé robuste; il était entouré d'amis, il faisait l'honneur et la joie d'une famille prospère : tout semblait lui promettre encore une longue et heureuse existence. Un an après le profond chagrin que lui avait causé la perte de son frère, une catastrophe imprévue a interrompu son œuvre, brisé ses amitiés et plongé les siens dans les larmes.

Nous ne pouvons offrir à sa compagne dévouée et à ses

Digitized by Google

enfants que le témoignage de notre respectueuse sympathie et de notre douleur commune.

La carrière de M. Cornu présente le noble exemple d'une vie entière consacrée à la science sans aucune interruption. Il fuyait, d'une manière systématique, toutes les circonstances capables de le détourner de ses travaux, qu'il a continués jusqu'à sa dernière heure, jusqu'au moment du moins où les forces lui ont fait subitement défaut.

Dès sa sortie de l'École Polytechnique, dans les intervalles de ses études d'élève-ingénieur à l'École des Mines, M. Cornu prit à tâche de reproduire toutes les expériences indiquées dans le célèbre *Traité d'optique* de Billet. Il acquit ainsi une connaissance approfondie et familière des phénomènes, en même temps qu'il en discutait avec un soin minutieux les interprétations théoriques. Doué d'une rare habileté manuelle, qualité précieuse pour un physicien, il pouvait réaliser les expériences les moins usuelles avec les ressources courantes des laboratoires et improviser, suivant son expression favorite, toutes sortes d'appareils ingénieux, pour lesquels on a trop souvent l'habitude d'attendre le concours des constructeurs de précision.

Cette éducation scientifique peu commune explique sans doute comment M. Cornu a pu parcourir successivement toutes les branches de l'optique, améliorant en divers points les méthodes de calcul ou d'observation, redressant les erreurs devenues classiques et glanant, en mainte circonstance, des trouvailles heureuses dont la science a tiré profit.

Son premier travail sur la réflexion cristalline a vivement attiré l'attention des hommes compétents. Sans connaître l'espèce de discipline qu'il s'était imposée, on pouvait à bon droit s'étonner qu'un débutant eût le courage d'aborder une des questions qui ont préoccupé les plus grands esprits, Fresnel, Cauchy, Neumann et Mac Cullagh. Le problème de la réflexion et de la réfraction est, pour

Digitized by Google

ainsi dire, l'épreuve cruciale des théories d'optique, et tout progrès dans cette voie est une contribution importante à la science.

On trouve déjà, dans ce mémoire de M. Cornu, les caractères qui distinguent son œuvre générale et la tournure de son esprit. Sans négliger les ressources de l'analyse algébrique, où parfois les idées ne se dégagent pas facilement des formules abstraites et des symboles, il préférait en traduire les résultats sous une forme géométrique plus palpable et plus propre à les fixer dans la mémoire. C'est ainsi qu'il a été conduit, pour les divers cas de réflexion et de réfraction, à une série de théorèmes élégants, auxquels son nom reste attaché.

Ses excursions variées dans le domaine de l'optique ont été très fécondes. Je citerai, en particulier, ses recherches sur l'interprétation géométrique des formules de Fresnel relatives à la diffraction, la formation des images multiples dans les réseaux à traits circulaires ou rectilignes de distances inégales, les polariseurs à pénombre, la détermination expérimentale de la surface d'onde dans les cristaux à deux axes optiques, la forme de la surface d'onde dans la polarisation rotatoire magnétique et l'achromatisme des franges d'interférence ou de diffraction, idée originale et simple, dont les applications se sont ensuite étendues à un grand nombre de cas qu'il n'avait pas prévus.

Les hommes de notre temps n'ont plus guère souvenir de l'époque mémorable où Arago, dont la vue s'était affaiblie, abandonnant l'espoir qu'il avait conçu de mesurer la vitesse de propagation de la lumière par des expériences de laboratoire, laissa à des savants plus jeunes le soin de résoudre ce grand problème.

Fizeau, qui avait imaginé la méthode devenue célèbre de la roue dentée, la mit aussitôt à exécution entre Montmartre et Suresnes. Le succès de cette expérience fut

Digitized by Google

éclatant ; le résultat était conforme à celui qu'on n'avait déduit jusqu'alors que des observations astronomiques.

Plus tard, Foucault utilisa, dans le même but, la méthode du miroir tournant, qui se prête à une moindre distance entre les appareils. La valeur numérique ainsi obtenue fut sensiblement plus faible et paraissait plus voisine de la vérité, de sorte qu'il resta des doutes sur l'exactitude que comportait l'emploi de la roue dentée. Fizeau n'avait eu, d'ailleurs, en vue que de mettre en évidence l'efficacité de sa méthode, et il désirait vivement que l'expérience fût réalisée dans de meilleures conditions.

Les difficultés pratiques étaient plutôt de nature à séduire M. Cornu qu'à le décourager. Pendant de longues années, il s'appliqua à déterminer, par des essais préliminaires, tous les éléments du problème, la marche des rayons à l'aller et au retour, la loi de distribution de l'éclairage, les apparences complexes de l'extinction graduelle au moment des éclipses et la mesure de la vitesse de rotation de la roue dentée. Une fois en pleine possession de la méthode et de toutes les conditions accessoires, il fit les expériences définitives entre l'Observatoire et la tour de Montlhéry, malheureusement sous le climat de Paris, où l'atmosphère rarement claire et calme lui causa beaucoup de déceptions. Le mémoire magistral, qui contient l'ensemble de ces recherches, est un modèle, soit au point de vue expérimental, soit comme discussion minutieuse, des résultats et du degré de confiance qu'ils doivent inspirer.

Le nombre final se rapprocha de la vitesse donnée par Foucault ; mais les travaux ultérieurs de divers savants, par l'emploi du miroir tournant, parurent fixer une valeur numérique intermédiaire aux précédentes.

M. Cornu résolut alors de se remettre à la besogne sous un meilleur climat et avec de nouveaux perfectionnements dans les détails d'exécution.

Digitized by Google

Grâce au concours de M. Perrotin, directeur de l'Observatoire de Nice, qui s'associe à cette entreprise avec beaucoup de zèle, un grand nombre d'expériences ont déjà été faites à diverses distances. Le programme est plus vaste; nous avons la confiance qu'il sera pieusement rempli, pour mener à bonne fin le dernier travail scientifique, en partie posthume, de notre regretté confrère.

Je ne puis qu'indiquer brièvement d'autres recherches, sur la mesure de la densité de la Terre par la méthode de Cavendish, en commun avec M. Baille, sur diverses questions d'acoustique avec M. Mercadier, sur les propriétés optiques de l'atmosphère, les bandes d'absorption de la vapeur d'eau dans le spectre, l'absorption graduelle des radiations très réfrangibles de la lumière solaire en raison de l'épaisseur de la couche d'air traversée, la distribution des groupes de raies appartenant à divers corps simples, en particulier à l'hydrogène, enfin la méthode si élégante qui permet de constater, par une sorte de balancement des raies, la vitesse inégale des différents points de la surface solaire.

M. Cornu prit une part importante aux préparatifs des expéditions organisées pour observer le passage de Vénus sur le Soleil. C'est à cette occasion qu'il étudia l'achromatisme des objectifs et fit adopter l'écartement des verres pour améliorer les épreuves photographiques. Il apporta également une collaboration très active aux travaux de la Commission française du mètre, où il fit toutes les mesures difficiles qu'exigeait la comparaison du mètre légal des Archives avec l'étalon devenu international déposé au Bureau de Breteuil.

Ce genre de recherches l'amena aux questions de géodésie et d'astronomie, et sa place était marquée au Bureau des Longitudes, où il a publié dans l'*Annuaire* de nombreuses notices si remarquées pour leur précision et leur clarté.

Digitized by Google

Dans cet ordre d'idées, je voudrais terminer en rappelant son beau travail sur la synchronisation des pendules. Le problème de l'unification de l'heure consiste, avec une horloge centrale dont la marche est connue et aussi régulière que possible, à transmettre les mêmes indications à des mécanismes éloignés, ou imposer le même mouvement à d'autres horloges.

Beaucoup de solutions ont été proposées et mises en pratique. Pour les horloges dont on modifie ainsi la marche, on peut même ajouter que la question est résolue par des formules analytiques relatives au mouvement d'un pendule soumis à des perturbations périodiques.

Ici encore, M. Cornu a remplacé les formules par leur traduction géométrique et réalisé pratiquement, par les méthodes les plus ingénieuses, des expériences de contrôle qui reproduisent les diverses courbes déduites de la théorie.

La conclusion est remarquable par sa simplicité. Pour qu'on puisse imposer à un système oscillant une période différente de celle qu'il aurait de lui-même, il faut que ses vibrations propres soient naturellement amorties. En d'autres termes, pas d'amortissement, pas de synchronisme.

Une belle application en a été faite à l'Observatoire de Nice. Rien n'est plus impressionnant que d'y voir le grand pendule de 4 mètres décrire avec une majestueuse lenteur des oscillations qui, à chaque période, transmettent un ordre électrique à toutes les horloges de l'établissement et les maintiennent en concordance à la même seconde.

Par son œuvre considérable, M. Cornu restera une des gloires de la science française. Sa fin prématurée laisse un grand vide dans l'Académie des Sciences, qui aimait à entendre sa voix claire et sympathique, et suivait volontiers ses avis, toujours inspirés par un sentiment élevé de la vérité et un respect des traditions. La section de

Digitized by Google

physique, dans laquelle sa bonne grâce avait maintenu des relations de réelle cordialité au-dessus des divergences d'opinion passagères, en est vraiment décapitée.

DISCOURS DE M. LE GÉNÉRAL BASSOT

Membre de l'Institut, Président du Bureau des Longitudes,

AU NOM DU BUREAU DES LONGITUDES.

Messieurs,

M. Cornu laisse un grand vide au Bureau des Longitudes. Il lui appartenait depuis seize ans; pendant seize ans, il n'a cessé de lui donner sa part de collaboration aussi dévouée que féconde.

Il aimait cette Compagnie, où géomètres, physiciens, astronomes, géographes, marins, militaires, artistes mécaniciens se confondent dans un commun effort pour remplir la haute mission qui lui est confiée. Le Bureau doit chaque année publier la *Connaissance des Temps* et l'*Annuaire*, ouvrages indispensables aux marins, aux astronomes et aux géographes, et qui exigent de patientes études pour être constamment à jour et maintenus au niveau de la science. Mais son rôle est aussi et surtout d'exercer un patronage éclairé des grandes entreprises astronomiques, géodésiques et géographiques. Il s'y applique avec un légitime orgueil, et son histoire est pleine d'opérations mémorables qu'il a suscitées, encouragées et guidées. Pour une telle tâche, il n'est pas trop d'avoir réunies des compétences scientifiques très variées. Comme physicien, Cornu y a tenu une grande place.

Partout, d'ailleurs, ses avis avaient une haute autorité.

Digitized by Google

Il était doué d'un don de vive pénétration qui lui permettait de faire ressortir très sûrement les difficultés d'ordre physique intervenant dans les problèmes. Par là, son influence a été considérable. Elle s'est exercée dans les assises des nombreuses commissions dont il a été appelé à faire partie : c'était à la Commission du passage de Vénus, au Comité international des poids et mesures, à l'Association géodésique internationale; ce fut aussi pour la carte photographique du ciel, pour la variation du pôle terrestre; c'était encore hier pour le magnétisme, dont une étude systématique était provoquée par le Bureau, et déjà commencée avec le concours de nos officiers de vaisseau. Dans toutes ces réunions, ses suggestions éclairées ont ouvert la voie à de nombreux progrès.

Au Bureau des Longitudes, Cornu s'était particulièrement attaché à développer et à perfectionner l'*Annuaire*. Qui n'a pas eu entre les mains ce petit volume, qui est une véritable encyclopédie? On y trouve tout ce qui est utile au savant, au voyageur, à l'industriel, au commerçant, à l'agriculteur même. Chacun le consulte, chacun en a besoin. Mais, s'il a de nombreux lecteurs, ces lecteurs veulent être tenus au courant des nouveautés : c'est à satisfaire cette légitime passion que s'applique le Bureau.

Dès son arrivée, Cornu commence à reviser les articles qui sont de sa compétence, et, depuis, il ne se passe pas une année qu'il n'apporte une pierre neuve à l'édifice. L'énumération en serait trop longue, s'il fallait indiquer tous les chapitres qu'il a renouvelés, ajoutés pour mettre l'*Annuaire* à la hauteur de la science actuelle. Son précieux concours a beaucoup aidé à maintenir à notre Recueil la faveur du public.

Mais c'est principalement dans ses notices scientifiques que Cornu s'est révélé comme un maître. L'introduction des notices dans l'*Annuaire* remonte à 1810; les articles qu'on insère ont pour objet de vulgariser les progrès de la

Digitized by Google

science ; leur collection depuis l'origine formerait un volume bien curieux et bien intéressant : ceux qu'a publiés Arago, de 1824 à 1853, sont restés célèbres. Depuis, la tradition s'est continuée avec Delaunay, avec M. Faye, avec Tisserand. Le Bureau tient à honneur de la maintenir chaque année.

Les notices que nous devons à Cornu sont du domaine de la lumière et de l'électricité. L'une porte sur la méthode Doppler-Fizeau qui permet de déterminer par l'analyse spectrale la vitesse des astres dans la direction du rayon visuel ; dans une autre, il décrit la mire lointaine de l'Observatoire de Nice, qu'il avait imaginée lui-même en appliquant le principe de la réflexion d'un rayon lumineux parti de l'Observatoire même sur un miroir convenablement orienté, placé à grande distance, et qui est ensuite renvoyé directement dans la lunette méridienne : c'est un appareil ingénieux qui avait déjà trouvé son application dans les expériences sur la vitesse de la lumière et qui rend de précieux services. Et, puisque je parle de l'Observatoire de Nice, je ne saurais oublier de mentionner avec quelle passion Cornu se préoccupait de ce magnifique établissement, qui fut longtemps placé sous la tutelle scientifique du Bureau des Longitudes, et recherchait les perfectionnements susceptibles d'être apportés à son installation ; il le visitait chaque année ; il y a réalisé, en particulier, une organisation merveilleuse de la distribution de l'heure dans tous les pavillons d'observation : pour cela, il a d'abord fait construire et installer par notre collègue, M Gautier une grande horloge dont le balancier a 4 mètres de longueur et dont la marche diurne est si constante qu'elle varie à peine d'un dixième de seconde par jour ; puis cette horloge est reliée électriquement aux différents compteurs placés dans les pavillons, et ces compteurs sont rendus isochrones de l'horloge par un amortissement électro-magnétique ; grâce à cet artifice,

Digitized by Google

toutes les observations faites par les différents observateurs sont ramenées à un compteur unique.

Frappé du développement prodigieux que l'électricité a pris dans ces derniers temps et dont l'extension paraît encore aujourd'hui presque indéfinie, Cornu a pensé qu'il serait utile de nous initier aux conquêtes déjà acquises et de nous familiariser avec les nouvelles unités électriques récemment créées. C'est un immense service qu'il a rendu ; car ceux qui ont quelque peu vieilli, aussi bien que ceux qui sont restés étrangers pendant quelques années au progrès de l'électricité pratique, se trouvent aujourd'hui déroutés complètement, lorsqu'ils cherchent à comprendre la description des applications actuelles et à les rattacher à leurs connaissances antérieures. Pour se remettre à flot, il suffit de lire les quatre notices qu'il a successivement fait paraître sur les phénomènes électriques, et qui constituent une magistrale enquête de l'électricité moderne : c'est un chef-d'œuvre, me disait encore hier son ami, M. Sarrau.

Cornu professait un culte presque filial pour les grands maîtres français de la physique : c'est encore dans deux notices de l'*Annuaire* qu'il a tenu à rendre l'hommage qu'ils méritaient à deux de ses illustres devanciers, Fresnel et Fizeau, dont les admirables découvertes ont renouvelé la théorie de l'optique et dont l'influence s'est étendue bien loin dans le domaine de la philosophie naturelle.

Il n'était que juste de mettre en relief la fécondité de notre collègue dans les publications du Bureau des Longitudes et le grand labeur qu'il leur a consacré; nous avons été les témoins de ses efforts constants pour maintenir à notre Compagnie le prestige auquel elle doit prétendre d'une activité sans limites; il avait toujours sur chantier une nouvelle étude à laquelle il se consacrait avec ardeur : il y pensait toujours; ses notes ne le quittaient jamais; c'était un travailleur incomparable. Et quelle lim-

Digitized by Google

pidité dans son exposition, quel merveilleux talent pour mettre à la portée de tous la solution des problèmes les plus ardus!

La mort nous l'enlève dans le plein épanouissement de ses hautes facultés; elle nous prive d'un collègue aimable et bienveillant, d'un collaborateur émérite, d'un conseiller éclairé. Le Bureau des Longitudes déplore sa perte prématurée et gardera sa mémoire avec un pieux respect pour les services éminents qu'il lui a rendus.

DISCOURS DE M. LE GÉNÉRAL DEBATISSE

Commandant de l'École Polytechnique,

AU NOM DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE.

Messieurs,

J'ai la douloureuse mission de venir, au nom de l'École Polytechnique, saluer d'un dernier adieu la dépouille mortelle du savant distingué, de l'éminent professeur que nous pleurons aujourd'hui et dont la mort prématurée met en deuil le monde savant tout entier.

Alfred Cornu est entré à l'École Polytechnique en 1860, à l'âge de dix-neuf ans. Il en est sorti un des premiers, en 1862, et a choisi le Corps des Mines. Deux ans plus tard, en 1864, étant encore élève-ingénieur, ses premiers travaux le signalèrent à l'attention des Conseils de l'École et il fut nommé à l'emploi de répétiteur du cours de physique. En 1867, c'est-à-dire à l'âge de vingt-six ans, il y recueillait la succession de Verdet dans la chaire de physique, qu'il occupa depuis cette époque sans interruption.

Pendant l'année terrible, dans Paris investi et affamé de nouvelles, alors qu'un intérêt si grand s'attachait à

Digitized by Google

l'établissement des communications avec l'extérieur, Cornu sut trouver le moyen de déchiffrer, rapidement et pratiquement, les dépêches microscopiques apportées par les pigeons voyageurs, et rendit ainsi à la défense nationale des services qui méritent d'être rappelés.

Des voix plus autorisées que la mienne vous ont retracé sa carrière scientifique et vous ont rappelé les beaux travaux qui l'ont classé, jeune encore, parmi les physiciens les plus distingués et lui ont ouvert à trente-sept ans les portes de l'Institut.

Mais, si je suis moins qualifié pour parler de son œuvre, j'ai pu, par contre, au cours de ces deux dernières années, apprécier ses qualités personnelles, sa grande bienveillance et la conscience avec laquelle il s'occupait de toutes les questions concernant, non seulement son enseignement particulier, mais aussi l'enseignement général de l'École.

Comme professeur, il savait allier à une science profonde un remarquable talent d'exposition.

Dans les Conseils de l'École, nul ne savait mieux que lui résumer une discussion et, dans un langage plein de chaleur, défendre les mesures qui, dans son esprit, lui paraissaient intéresser l'avenir de l'École.

Pourquoi faut-il que la mort cruelle soit venue l'arracher ainsi à ses travaux, à l'affection des siens, et briser cette existence si utile encore au pays et à la science?

Aussi est-ce avec une bien vive émotion que j'adresse, au nom de l'École, à sa famille si cruellement éprouvée, l'expression de notre profonde et douloureuse sympathie.

Digitized by Google

DISCOURS DE M. MERCADIER

Directeur des Études à l'École Polytechnique,

AU NOM DU CORPS ENSEIGNANT DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE.

Messieurs,

Le corps enseignant de l'École Polytechnique, privé subitement et cruellement de son doyen, a dans cette triste cérémonie sa place toute naturelle. C'est au nom de ses collègues et de ses collaborateurs, qui furent ses amis, que je viens adresser à Cornu le suprême adieu.

Depuis 1864, il appartenait à l'École Polytechnique : pendant trente-huit ans, il lui a consacré la plus grande partie de sa vie. Il l'aimait profondément. Dans ses laboratoires, si remplis de son activité, et maintenant si vides, on a dit les beaux travaux qu'il avait accomplis; peut-être appartient-il de dire comment il les faisait à celui qui fut le plus ancien de ses collaborateurs, avant, pendant et après les jours et les nuits de l'année terrible.

Dès son séjour à l'École des Mines, et jusqu'à ces derniers jours, ce fut un travailleur infatigable. La recherche scientifique fut sa grande passion : passion très désintéressée, car il aimait la science pour elle-même et non pour ce qu'elle peut rapporter.

Dans les premières années, il passa sa vie au laboratoire; plus tard, il y vécut tout le temps que lui laissaient ses devoirs de famille. Son ardeur au travail ne s'apaisa jamais. Il avait toujours sur le chantier plusieurs œuvres commencées, se délassant de l'une, disait-il, en passant à l'autre.

Le travail, qui, pour la plupart des hommes, est une peine, fut toujours pour lui une joie. Il travaillait avec allégresse : sans cesse on l'entendait se mettre à l'œuvre

Digitized by Google

en chantant, et, comme un bon ouvrier qui a bien rempli sa journée, il chantait encore en finissant.

Et d'ailleurs c'était un ouvrier manuel remarquable : dès qu'il avait conçu un appareil, le plus souvent il en exécutait le modèle de ses propres mains, avec des fils métalliques, des lames de laiton, des morceaux de bois; armé d'outils ordinaires, il construisait les machines les plus complexes, comme celle qui trace automatiquement des réseaux. En cela il était heureux, car il y gagnait du temps, et pour lui perdre du temps était une souffrance.

Doué d'une patience inaltérable, d'une singulière pénétration, il poursuivait ses expériences lentement, sûrement, ne laissant rien au hasard, et visant toujours à la perfection.

En toutes ses recherches se manifestent les mêmes caractères : l'ingéniosité originale d'un Foucault, la précision d'un Fizeau, l'élégance des solutions et l'esprit géométrique de son idéal scientifique, l'illustre Fresnel. Les résultats en formules ne lui plaisaient guère; mais, quand il avait réussi à représenter géométriquement les phénomènes étudiés, il était pleinement satisfait.

C'était véritablement un affamé de vérité, de précision, de clarté, de lumière.

Avec un pareil état d'âme, un esprit si avisé, une intelligence si compréhensive, avec la conscience scrupuleuse qu'il mettait en toutes choses, il devait être et il fut un professeur éminent. Les Conseils de l'École, en le nommant professeur à vingt-six ans, escomptèrent l'avenir : il dépassa toutes les espérances. Les milliers d'élèves qui suivirent ses leçons en peuvent témoigner; quant à ceux qui ont préparé ses cours avec lui, qui les ont étudiés, modifiés avec lui, ils savent le labeur incessant et profond qu'ils lui ont coûté!

Pour lui, un cours était comme une sorte d'organisme vivant qui devait se transformer sans cesse, en suivant

Digitized by Google

prudemment les progrès de la science, tout en restant simple et de plus en plus clair : être clair était son but, et, s'il se donnait tant de peine pour y parvenir, c'était pour en éviter à ses élèves. C'est ainsi qu'en recommençant pour chaque promotion son cours de physique, il le remaniait chaque fois, et ne se déclarait jamais satisfait; c'est pourquoi il ne voulut jamais le publier; c'est aussi pourquoi, jugeant cette tâche bien suffisante, il n'accepta jamais d'autres fonctions d'enseignement.

Père de famille modèle, parent dévoué, ami fidèle et sûr, la droiture de son caractère, la noblesse de ses sentiments, la fermeté de ses idées, faisaient de l'homme privé l'égal du professeur et du savant. Aimable, lettré, ami des arts, il était aussi accueillant et généreux; tous ceux qui ont collaboré avec lui, les travailleurs sérieux qui ont eu besoin de son aide, savent combien il prodiguait sans réserve son temps, ses conseils et sa peine.

Hélas! il prodiguait aussi sa vie. Les ressorts constamment tendus se brisent un jour; en quelques instants, d'un coup inattendu, la mort a fauché cette noble existence! Collègues, collaborateurs, amis de son âge, nous conserverons précieusement son souvenir; aux jeunes, sa vie servira d'exemple et de modèle. L'École qu'il a tant aimée ne l'oubliera jamais. Tout en conservant au fond du cœur cette chère mémoire, sa famille pourra recevoir quelque consolation (si l'on peut prononcer en ce jour un tel mot) à la vue de l'universelle sympathie dont elle est entourée; en songeant que celui qu'elle a perdu vivait déjà en pleine gloire scientifique, la plus pure des gloires; qu'il continuera à vivre dans la mémoire des savants du monde entier, et que des hommes tels que lui font honneur à l'humanité.

Digitized by Google

DISCOURS DE M. POINCARÉ

Membre de l'Institut,

AU NOM DE LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE

Messieurs,

Quand la mort nous enlève un homme dont la tâche est terminée, c'est seulement l'ami, le maître ou le conseiller que nous pleurons; mais nous savons que son œuvre est accomplie et, à défaut de ses conseils, ses exemples nous restent. Combien elle nous semble plus impitoyable quand c'est un savant encore tout rempli de vigueur physique, de force morale, de jeunesse d'esprit, d'activité féconde, qui soudain disparaît; alors nos regrets sont sans bornes, car ce que nous perdons, c'est l'inconnu, qui par essence est sans limites; ce sont les espoirs infinis, les découvertes de demain que celles d'hier semblaient nous promettre.

De là cette émotion qui s'est emparée du monde savant tout entier quand cette nouvelle si imprévue, si foudroyante, est venue le frapper.

Pour la Société française de Physique, le deuil est particulièrement cruel. Il avait été un de nos fondateurs, et nous aimions à nous enorgueillir de ses travaux, à nous parer de l'éclat de son nom. Sa voix était toujours écoutée dans nos conseils, et nous avons peine à croire que nous ne l'y entendrons plus.

M. Cornu était né en 1841. En 1860, il entra à l'École Polytechnique, d'où il sortit deux ans après comme élève-ingénieur des Mines. Mais il abandonna de bonne heure le service actif des Mines pour entrer dans le corps enseignant de l'École Polytechnique. Dès 1871, à l'âge de trente ans, il fut nommé professeur de physique dans

Digitized by Google

cette grande École. Son enseignement fut tout de suite très goûté des élèves ; il inaugurait un mode nouveau d'exposition de la physique, et en particulier de la thermodynamique.

D'ailleurs, comme membre du Conseil de perfectionnement, il exerça, pendant plusieurs années, une grande influence sur l'évolution de l'École Polytechnique.

En 1878, il fut nommé membre de l'Académie des Sciences.

En 1886, il entra au Bureau des Longitudes, et on trouvera, dans l'*Annuaire* de ce Bureau, une série de notices que le public a beaucoup appréciées.

M. Cornu était membre de la Société Royale de Londres, des Académies de Turin, Rome, Vienne, Saint-Pétersbourg, de celles de Suède, de Belgique, de Boston.

Il fut président de la Société française de Physique et de la Société Astronomique de France.

Il était membre du Conseil de l'Observatoire de Paris, où il remplissait les fonctions de secrétaire, et du Conseil de l'Observatoire de Nice.

Récemment, quand il fallut, au Congrès de Physique, choisir un président pour recevoir dignement nos hôtes de 1900, c'est à lui que tout naturellement tous ont songé. Nul n'aurait présidé avec plus d'autorité ces débats, où nous avions convié tant d'illustres savants étrangers.

Il était désigné par sa gloire incontestée, qu'avait consacrée le suffrage de tant d'Académies étrangères, par l'étendue et la sûreté de sa science, par la justesse de son esprit.

Nous avons eu la primeur de presque toutes ses découvertes. Qui de nous ne se rappelle avec quelle limpidité il nous les exposait, avec quelle chaleur aussi, et surtout avec quelle élégance ? Il était aussi jaloux d'une clarté impeccable en face de ses collègues qu'en face de ses

Digitized by Google

élèves. Faire autrement eût été pour lui une souffrance; car ses goûts d'artiste en auraient été choqués. Et en effet l'artiste se retrouvait partout, chez le penseur, chez l'expérimentateur, chez le professeur.

Quand il imaginait ou qu'il construisait un appareil nouveau, quand il en étudiait les derniers détails, quand il le décrivait surtout, on sentait que ce n'était pas seulement à ses yeux un instrument, mais un objet d'art, et qu'il ne se préoccupait pas uniquement d'aller au but par le chemin le plus sûr et le plus court. La moindre imperfection le faisait souffrir, non parce qu'elle était une gêne, mais parce qu'elle était une tache.

Aussi, quand il aborda l'étude de la diffraction, il eut bientôt fait de remplacer cette multitude rébarbative de formules hérissées d'intégrales par une figure unique et harmonieuse que l'œil suit avec plaisir et où l'esprit se dirige sans effort. M. Cornu débuta dans la science par une théorie de la réflexion cristalline; il parvint à ramener ces lois si compliquées à des règles géométriques simples et élégantes et à construire géométriquement le plan de polarisation du rayon réfléchi à la surface d'un cristal.

Il reprit ensuite la méthode de M. Fizeau pour la mesure de la vitesse de la lumière ; il introduisit dans cette méthode d'importants perfectionnements et lui donna plus de précision. Il est certain maintenant que le chiffre définitif ne pourra pas s'écarter beaucoup de celui qu'il a trouvé.

J'ai déjà parlé de ses recherches sur la diffraction et les intégrales de Fresnel ; il n'abandonna jamais ce genre de recherches ; il a particulièrement étudié les réseaux, l'influence des inégalités périodiques ou systématiques des instruments qui servent à les tracer et les propriétés focales qui résultent de ces inégalités.

Les franges d'interférence lui ont fourni aussi l'occasion

Digitized by Google

de fines études ; il a recherché les conditions d'achromatisme de ces franges, et il s'est servi également de cet instrument si délicat pour étudier les déformations élastiques du verre. Rien de plus joli que les hyperboles irisées qu'il obtenait ainsi et qui montraient d'un coup d'œil tout l'ensemble de ces déformations infiniment petites.

Dans cette région mixte où l'optique confine à l'électricité, il a étudié à plusieurs reprises la polarisation magnétique, et tout récemment encore il a fait faire à cette partie de la science un progrès signalé. C'était au moment où le phénomène de Zeeman venait d'être découvert. Tout le monde croyait que les raies spectrales et en particulier la raie D se décomposaient en un triplet. Le premier, il vit qu'il y avait quatre composantes et que le soi-disant triplet était un quadruplet.

La spectroscopie le préoccupa beaucoup, et en particulier l'importante question du renversement des raies ; il montra clairement les conditions de ce phénomène si important en astronomie. Il a imaginé un procédé très ingénieux pour distinguer les raies telluriques des raies d'origine solaire. Il a étudié, en particulier, le spectre ultraviolet du soleil et son absorption par les parties supérieures de l'atmosphère. Ses études sur le spectre solaire, sur le spectre des étoiles nouvelles, sur celui de la couronne, sont appréciées vivement par les astronomes.

Ce n'est d'ailleurs pas là le seul service qu'il ait rendu à l'astronomie ; il a inventé une méthode photométrique pour l'observation des éclipses de Jupiter. Nul ne connaissait mieux que lui les instruments d'optique et, sur ce point, ses lumières ont largement profité à l'astronomie. Je citerai seulement une de ses dernières créations, cette lunette zénitho-nadirale, qui est une merveille de précision et une application d'une élégance inattendue des lois les plus simples de l'optique géométrique.

Digitized by Google

Je ne m'étendrai pas au sujet de ses recherches sur l'optique météorologique; mais je ne puis pas ne pas mentionner une invention très simple pour laquelle son nom devrait être béni de nombreux praticiens, car elle nous a débarrassés des inconvénients du halo photographique.

Puisque nous sommes sur les applications de l'optique, parlons encore du procédé stroboscopique si simple et si pratique qu'il a imaginé, il y a quelques semaines, pour déceler et mesurer les irrégularités de marche d'un alternateur.

La délicatesse de ses sens et en particulier l'extraordinaire finesse de son oreille lui furent précieuses dans d'autres recherches qu'il poursuivit en commun avec M. Mercadier. On discutait depuis longtemps sur les intervalles musicaux; les physiciens étaient partagés, les uns tenant pour la gamme dite de Platon, les autres pour celle de Pythagore. L'expérience conduisit M. Cornu à un résultat bien inattendu. Les musiciens emploient tantôt l'une, tantôt l'autre de ces deux gammes, suivant les cas. Ils ne s'en doutaient guère, et ils jetèrent les hauts cris quand on les en avertit; mais le fait n'en est pas moins hors de doute.

M. Cornu a repris la célèbre expérience de Cavendish pour la mesure de la densité moyenne du globe terrestre. Il a notablement perfectionné les méthodes, il a éliminé de nombreuses causes d'erreur et il a obtenu un nombre beaucoup plus précis que ceux qu'on possédait avant lui.

Tous les arts qui veulent de la précision l'intéressaient, et tous les ans il allait à Nice examiner l'horloge astronomique qu'il y avait installée d'après des principes tout nouveaux; il y apportait des perfectionnements incessants et il approchait chaque jour de la perfection absolue.

Dans le même ordre d'idées, il s'est occupé longtemps de la synchronisation électrique des horloges. Le problème semble facile; mais, en réalité, il exige bien des connais-

Digitized by Google

sances diverses; la preuve, c'est que les nombreux principes introduits par M. Cornu, et qui apportaient une solution complète et définitive, ne furent pas compris du premier coup.

Les derniers *Annuaires* du Bureau des Longitudes contiennent une série d'études consacrées par M. Cornu aux machines dynamo-électriques tant à courant continu qu'à courant alternatif ou triphasé; les notices destinées au grand public, mais qui contiennent une foule d'aperçus intéressants pour les savants eux-mêmes, seront prochainement réunies en volume. Il est peu de domaines en physique où il n'ait reculé les bornes de la précision, où il ne nous ait laissé quelque petit modèle d'une perfection achevée.

Mais l'optique l'a toujours attiré; il y revenait sans cesse, même quand cette science était délaissée par la mode. Les instruments d'optique, la diffraction, le spectre solaire, la vitesse de la lumière surtout, rappelaient constamment son attention. C'est en mesurant cette vitesse qu'il avait débuté; il y pensait encore dans ses derniers jours. Il avait conçu des projets grandioses dont la réalisation était commencée : il voulait faire voyager le rayon dont il devait mesurer la vitesse entre la Corse et le mont Mounier, où est la succursale de l'Observatoire de Nice.

Comme il aimait cet Observatoire, où il allait tous les ans et où ses conseils étaient hautement appréciés! Et comment ne pas évoquer le souvenir de ce voyage récent où nous l'avons vu, au sommet de ce mont Mounier, regardant la mer au-dessus de laquelle il voulait faire passer la lumière? Avec quelle confiance il parlait de son rêve, et qui de nous eût pu croire alors qu'il n'en verrait pas l'accomplissement?

C'est que, quand il croyait au succès, on pouvait le regarder comme assuré. Sa critique était sûre, et il se

Digitized by Google

défiait de l'enthousiasme. Il savait de quelles embûches l'expérimentateur est environné et à quel prix la précision ou la certitude scientifique peuvent s'acquérir. Nul ne savait mieux que lui prévoir tous les pièges, et en lui donnant la main on était certain de les éviter. Il n'est pas un physicien à qui ses conseils n'aient épargné quelque mécompte.

Aussi n'était-il pas dupe de ces modes passagères qui entraînent les foules scientifiques aussi facilement que les foules vulgaires. Toujours il attendait la preuve avant de croire.

Il aimait les débutants et il cherchait à les encourager; mais, en même temps, il les prémunissait contre les écueils sur lesquels leur ardeur juvénile aurait pu les entraîner. Ceux qui avaient accepté sa discipline ne tardaient pas à en reconnaître la sagesse.

Tel est l'homme éminent que nous avons perdu. Mais ce n'était pas seulement l'élévation de sa pensée qui faisait le charme de son commerce; c'étaient encore sa bonté, sa modestie, sa simplicité. Ce savant, ce maître, ce guide était, en même temps, un ami sûr; et ce deuil, qui atteint notre Corps, atteint aussi chacun de nous.

Digitized by Google

RECHERCHES

SUR LES

ACIERS AU NICKEL A HAUTES TENEURS

Par M. L. DUMAS, Ingénieur des Arts et Manufactures,
Ingénieur-Conseil, Ancien Chef du Service métallurgique de la Société
de Commentry-Fourchambault et Decazeville.

INTRODUCTION.

Les aciers au nickel attirent depuis longtemps l'attention des métallurgistes et des physiciens, qui leur ont consacré de nombreux travaux ; mais les résultats de ces travaux sont épars dans les publications de diverses Sociétés ou dans des revues, et c'est vraiment une tâche considérable que d'en former un ensemble pouvant guider le producteur et le consommateur dans les applications nouvelles.

Lorsque les Aciéries d'Imphy ont entrepris la fabrication des aciers au nickel, elles ont dû rechercher les résultats déjà connus, les reproduire à nouveau en grande partie, et les compléter par des recherches nouvelles. C'est l'ensemble des résultats ainsi obtenus que nous nous proposons d'exposer en y joignant les considérations qu'ils nous ont suggérées. Nous espérons que cet exposé contribuera à développer les applications de ces aciers, et particulièrement à hâter l'utilisation des propriétés extrêmement remarquables de certains d'entre eux.

A mesure que nos recherches suivaient leur cours, l'attraction exercée par les idées de M. Osmond devenait de plus en plus irrésistible ; aussi nos vues se sont-elles net-

Digitized by Google

tement orientées dans le sens des théories allotropistes. M. Osmond a bien voulu prendre connaissance de notre travail et nous faire bénéficier de ses avis ; nous lui en exprimons notre vive reconnaissance.

Ces recherches nous ont procuré le grand privilège d'un contact permanent avec les savants du Bureau international des Poids et Mesures. Nous aurons notamment l'occasion de signaler d'importantes contributions de M. Ch.-Ed. Guillaume à l'étude générale des aciers au nickel ; mais ce n'est pas à ces travaux que se limitent les résultats de nos rapports avec ce savant ; son influence plus ou moins latente s'est fait sentir dans nos recherches à peu près partout.

Premières recherches d'Imphy. — Les premières recherches d'Imphy sur les aciers au nickel ont été entreprises en 1894, sous la direction de M. Werth, alors directeur des Usines de Fourchambault et d'Imphy (*), pour répondre à une demande de l'Atelier de construction de l'artillerie à Puteaux ; elles ont abouti à la préparation d'un acier de composition spéciale, dénommé à Imphy acier NC-4, qui, dans la suite, a été adopté par l'artillerie, et lui a été livré par Imphy et par d'autres aciéries en quantités très considérables. D'autres applications de cet acier ont aussi été étudiées pendant la même période, et quelques résultats intéressants ont été obtenus avec d'autres compositions d'acier au nickel, notablement différentes de celle de l'acier NC-4.

Les divers résultats obtenus à Imphy pendant l'année 1895 ont attiré l'attention de l'Administration de la Marine,

(*) Les recherches ont été poursuivies à Imphy, à partir de l'année 1896, par les soins de M. Adenot, directeur, avec le concours de MM. Girin, ingénieur principal, Dauphin, Gineste, Coupeau, Meunier et Gay-Lussac, ingénieurs, et à Paris avec le concours de M. Delabroise, ingénieur.

Digitized by Google

qui a prescrit aux Forges nationales de la Chaussade à Guérigny de faire une étude de ces nouveaux aciers. M. Abraham, ingénieur de la Marine, alors attaché aux Établissements de Guérigny, a ainsi été amené à suivre certains travaux aux Aciéries d'Imphy; il en a rendu compte dans un mémoire étendu, publié dans les *Annales des Mines* en 1898 (*), où il fait avec une grande clarté un exposé très détaillé des résultats acquis antérieurement à l'année 1896. Nous n'avons rien à ajouter à ce compte rendu très complet de toutes les constatations faites à cette époque ; aussi prierons-nous le lecteur de se reporter à ce mémoire pour l'examen du détail des essais pendant cette première période de nos recherches.

Travaux du Bureau international des Poids et Mesures. — Une impulsion nouvelle a été donnée, en 1895, à nos travaux. C'est à cette époque que nos relations avec le Bureau international des Poids et Mesures se sont établies, grâce à l'aimable intermédiaire de M. le lieutenant-colonel Hartmann, alors chef de l'atelier de précision de la section technique à Saint-Thomas-d'Aquin, qui a bien voulu nous mettre en rapport avec M. Benoît, l'éminent directeur du Bureau international. Nos recherches, encouragées par ce contact, ont abordé l'étude des aciers à haute teneur en nickel, manganèse et chrome, non seulement au point de vue de leurs propriétés mécaniques, mais aussi au point de vue plus général de leurs diverses propriétés physiques, et plus particulièrement de leurs transformations allotropiques, caractérisées notamment par l'apparition ou la disparition du magnétisme.

M. Benoît, dans le premier entretien que nous avons eu avec lui à Saint-Thomas-d'Aquin, nous a fait con-

(*) *Annales des Mines*, t. XIV, p. 225.

Digitized by Google

naître que la métrologie porte grand intérêt aux recherches relatives à des métaux ou des alliages convenables pour la construction des étalons de mesures dits secondaires, c'est-à-dire pouvant remplacer le platine, dont le prix est trop élevé. Les qualités indispensables pour des étalons secondaires sont, outre un prix de revient modéré, une grande homogénéité et une faible oxydabilité (*). Il était intéressant de rechercher, parmi les aciers au nickel, un métal satisfaisant à ces conditions.

Des échantillons préparés par Imphy ont été étudiés successivement au Bureau international des Poids et Mesures par M. Benoît lui-même, et par MM. Chappuis et Ch.-Ed. Guillaume, physiciens adjoints au directeur du Bureau; la découverte, faite par M. Ch.-Ed. Guillaume, d'une remarquable anomalie de dilatation présentée par un acier à 30 p. 100 de nickel, a été l'origine d'une fructueuse collaboration.

M. Ch.-Ed. Guillaume a rendu compte, dans plusieurs publications, des importants travaux qu'il a entrepris au Pavillon de Breteuil sur les échantillons qu'Imphy a préparés sur sa demande; ces travaux sont relatifs aux lois de la dilatation et à d'autres propriétés physiques des aciers au nickel : magnétisme, élasticité, densité, résistance électrique, etc. Nous renverrons aux remarquables mémoires de M. Guillaume (**) le lecteur désireux de prendre connaissance du détail des travaux de haute pré-

(*) M. Benoît a bien voulu nous adresser à ce sujet une lettre du 13 mars 1895, dont nous donnons ci-après un extrait :

« Si vous étiez disposé à nous aider dans cette recherche d'un métal bon marché, relativement au platine, et propre à construire des étalons peu altérables, recherche qu'on pourrait croire très simple, mais dans laquelle, après bien des tentatives, nous ne sommes arrivés encore à rien de satisfaisant, vous nous rendriez, aussi bien qu'à la science et aux constructeurs en général, un véritable service. »

(**) *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, janvier, avril, juin et juillet 1897; *Bulletin de la Société d'Encouragement*, mars 1898, etc.

Digitized by Google

cision qu'il a réalisés dans les laboratoires du Bureau international, et nous nous bornerons à signaler, dans le cours de cet exposé, celles des découvertes de M. Guillaume qui ont été plus particulièrement utilisées dans nos propres recherches.

Nous rappellerons cependant brièvement quelques-uns des résultats pratiques de ces travaux. Ils permettent à Imphy d'obtenir des aciers presque indilatables, utilisés pour les appareils de précision, la géodésie, l'horlogerie, etc.; des aciers spéciaux pour ressorts auto-compensateurs de montres; des aciers ayant la dilatation du verre, utilisés dans la fabrication des lampes à incandescence pour remplacer le platine, et utilisables dans la fabrication d'un verre armé (procédé L. Appert) à l'abri des variations de la température.

Les nombreux échantillons préparés pour les études de M. Ch.-Ed. Guillaume ont été étudiés parallèlement par nous au point de vue de certaines propriétés physiques, intéressant plus particulièrement la métallurgie. Joints à d'autres échantillons prélevés en cours de fabrication de produits destinés à la clientèle, ou préparés spécialement pour nos recherches, ils ont formé une intéressante série qui nous permet d'apporter quelques contributions nouvelles à l'étude des propriétés très complexes des aciers au nickel contenant, à côté de ce métal, du carbone, du manganèse et du chrome.

Digitized by Google

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DES ACIERS AU NICKEL.

DIVISION DES ACIERS AU NICKEL EN QUELQUES GROUPES PRINCIPAUX.

Premiers essais de classification. — Une étude méthodique de l'influence des additions progressives de nickel sur les propriétés mécaniques des aciers fait bientôt constater des anomalies difficilement explicables dans l'ignorance des lois particulières qui régissent ces phénomènes, d'où la nécessité de grouper les échantillons ayant des propriétés analogues, de manière à mettre ces lois en évidence. La classification admise à Imphy en 1895 distinguait trois catégories d'aciers au nickel (*) :

1° *Aciers à teneurs en nickel comprises entre* 2 *et* 5 *p.* 100. — L'addition du nickel relève la limite d'élasticité et augmente la résistance à la rupture. Ces aciers se forgent et se laminent bien, et se travaillent à froid aux machines-outils.

2° *Aciers à teneurs en nickel comprises entre* 10 *et* 20 *p.* 100. — Ces aciers sont très fragiles, surtout après trempe. Ils se forgent et se laminent bien; mais on ne peut pas les usiner à froid avec les machines-outils.

3° *Aciers à teneurs en nickel comprises entre* 20 *et* 25 *p.* 100. — Ces aciers se font remarquer par une limite d'élasticité peu élevée, un allongement à la rupture très grand, une absence de fragilité remarquable. Le métal se forge et se lamine bien; l'usinage à froid est difficile, mais possible.

Les renseignements dont nous disposons actuellement

(*) Voir le mémoire de M. Abraham (*Annales des Mines*, septembre 1889, p. 245).

Digitized by Google

ne permettent plus d'admettre cette classification, qui a été basée sur un petit nombre de résultats, auxquels un caractère trop général a été attribué.

Influence des éléments autres que le fer et le nickel. — Il était difficile de se rendre compte, pendant cette première période de recherches, de l'influence que peuvent avoir, sur les propriétés physiques et mécaniques, des modifications peu importantes en apparence des teneurs en carbone, chrome et manganèse ; or cette influence est parfois très considérable.

Tous les aciers au nickel qui sont fabriqués au four Martin ou au creuset contiennent, outre le fer et le nickel, du carbone, du silicium, du manganèse, du phosphore et du soufre ; ils contiennent aussi parfois du chrome.

Le carbone, le phosphore et le soufre sont introduits par les matières premières avec le fer.

On constatera dans la suite que le carbone est un des éléments les plus importants des aciers au nickel ; la teneur en carbone doit donc être l'objet d'une attention toute particulière.

Le phosphore et le soufre sont, pour les aciers au nickel comme pour tous les aciers spéciaux, des éléments très nuisibles, des impuretés, et doivent être soigneusement réduits au minimum par l'emploi de matières premières très pures.

Le silicium est introduit généralement dans l'acier par son contact avec le creuset ou la sole siliceuse du four. Sa teneur dépasse rarement 0,5 p. 100 ; il semble que l'influence de ce métalloïde soit, dans ces conditions, très peu importante.

Le manganèse est indispensable pour donner aux aciers au nickel les qualités à chaud nécessaires pour qu'ils puissent être forgés ou laminés dans de bonnes conditions ; ce résultat est généralement obtenu lorsque la

Digitized by Google

teneur de ce métal est comprise entre 0,3 et 0,5 p. 100. Dans ces conditions, l'influence du manganèse sur les propriétés mécaniques du métal est minime. Il n'en est pas de même dans le cas des aciers spéciaux au manganèse, dans lesquels la teneur en manganèse peut s'élever beaucoup, mais en modifiant considérablement les propriétés physiques et mécaniques.

La présence du chrome n'est constatée dans les aciers que lorsqu'une addition de chrome a été faite.

A composition chimique semblable, nous ne faisons pas de distinction importante entre les aciers préparés au four Martin ou au creuset. En fabrication courante, Imphy emploie de préférence le four Martin, plus avantageux au point de vue du prix de revient, et c'est exclusivement par ce mode de fabrication qu'ont été obtenus les gros tonnages d'acier au nickel qu'il a livrés. Mais les fabrications de faible importance ou d'essai ne peuvent guère être réalisées dans des conditions pratiques qu'au four à creusets; c'est ainsi qu'ont été préparés presque en totalité les échantillons de teneurs diverses qui ont été utilisés dans ces recherches.

Il n'a pas été possible d'obtenir à Imphy, au four Martin ou au creuset, des aciers au nickel composés exclusivement de fer et de nickel et possédant les qualités à chaud et à froid nécessaires pour le traitement métallurgique (*). C'est à regretter au point de vue de certaines constatations qui auraient été facilitées, car les résultats obtenus à l'essai de certains échantillons, à teneurs en carbone, silicium et manganèse particulièrement réduites, ont accusé des propriétés physiques notablement diffé-

(*) C'est, semble-t-il, pour cette raison que la Commission instituée par la Société d'Encouragement pour l'Industrie de Berlin, qui avait cherché à réaliser des alliages aussi purs que possible, a obtenu des résultats peu utiles pour la métallurgie des aciers au nickel (Voir la traduction française de M. Castagnol : *Bulletin de la Société d'Encouragement*, février 1877, p. 269).

Digitized by Google

rentes de celles des échantillons qui contiennent ces éléments en proportions un peu plus élevées.

Il semble que les alliages ne contenant exclusivement que du fer et du nickel aient des propriétés notablement différentes de celles des aciers au nickel proprement dits, qui contiennent toujours du manganèse et du carbone.

Nous signalerons en particulier que l'absence presque complète du carbone et du manganèse a eu généralement pour conséquence à Imphy, dans les essais de fabrication, l'obtention de lingots entièrement *organisés* en grandes aiguilles peu adhérentes entre elles, à tel point que ces lingots ne pouvaient supporter l'effort du forgeage et du laminage, et se brisaient au premier choc du traitement à chaud. Une légère addition de manganèse gêne cette organisation et, les éléments de structure étant plus petits, le forgeage et le laminage deviennent facilement réalisables. Cette tendance à l'organisation est particulièrement accusée pour les teneurs inférieures à 12 p. 100 de nickel. Pour les fortes proportions de nickel, 40 p. 100 et plus, une teneur en manganèse de 0,5 p. 100 environ est presque indispensable pour faire disparaître les défauts locaux nombreux qui peuvent rendre le métal pratiquement inutilisable.

Ne pouvant être supprimés complètement, les éléments autres que le fer et le nickel ont été réduits au minimum dans certains échantillons, dans lesquels on a ainsi éliminé autant que possible l'influence de ces éléments étrangers.

Composition chimique des principaux échantillons d'aciers utilisés dans ces recherches. — Le tableau qui suit donne la nomenclature des principaux échantillons d'aciers utilisés dans ces recherches, ainsi que leurs compositions chimiques.

Les analyses sont du laboratoire d'Imphy :

Digitized by Google

TABLEAU I.

DÉSIGNATION des échantillons d'aciers	COMPOSITION CHIMIQUE p. 100							
	Carbone	Silicium	Phosphore	Soufre	Manganèse	Chrome	Nickel	Fer
(1)	0.166	0.058	0.029	0.005	0.026	»	»	non dosé
(2)	1.303	0.256	0.020	0.061	0.588	0.727	1.16	»
(3)	1.650	0.292	0.032	0.026	2.022	0.445	2.18	»
(4)	0.520	0.243	0.038	0.040	0.595	2.830	4.95	»
(5)	1.137	non dosé	non dosé	non dosé	0.932	3.124	5.05	»
(6)	0.113	0.105	0.018	0.016	0.102	»	5.56	»
(7)	0.158	0.105	0.015	0.024	0.409	»	6.00	»
(8)	1.773	0.397	non dosé	non dosé	2.773	3.188	7.28	»
(9)	0.126	0.117	0.024	0.027	0.256	»	8.28	»
(10)	0.107	0.093	0.018	0.016	0.256	»	9.92	»
(11)	1.370	0.409	0.010	0.054	2.713	»	10.00	»
(12)	1.252	0.469	0.032	0.052	1.994	2.786	10.16	»
(13)	0.312	0.421	0.037	0.045	0.466	2.921	10.20	»
(14)	0.194	0.117	0.016	0.020	0.307	»	11.28	»
(14 *bis*)	0.169	0.105	0.013	0.035	0.338	»	11.36	»
(15)	0.726	0.584	0.065	0.059	0.610	2.700	12.04	»
(16)	1.100	0.338	0.031	0.040	0.915	3.55	13.34	»
(17)	0.137	0.082	0.026	0.018	0.128	»	13.60	»
(17 *bis*)	0.159	0.070	0.016	0.015	0.102	»	14.00	»
(18)	0.960	0.433	0.070	0.042	1.113	3.102	14.40	»
(19)	1.027	0.373	0.038	0.042	1.222	»	14.44	»
(20)	0.170	0.292	0.073	0.045	0.819	»	14.52	»
(21)	1.360	0.551	0.026	0.044	2.072	»	14.80	»
(22)	0.329	0.210	0.023	0.048	0.595	2.830	15.08	»
(23)	0.257	0.256	0.031	0.061	0.129	2.800	15.36	»
(24)	1.050	0.350	0.023	0.063	1.106	1.730	15.64	»
(25)	1.130	0.385	0.026	0.035	1.888	»	15.88	»
(26)	0.162	0.117	0.026	0.017	0.128	»	15.92	»
(27)	0.730	0.385	0.015	0.039	0.425	»	15.92	»
(28)	0.535	0.350	0.048	0.052	0.828	3.020	16.05	»
(29)	0.397	0.469	0.043	0.051	0.632	1.750	16.06	»
(30)	0.706	0.584	0.048	0.063	1.170	2.025	16.16	»
(31)	0.505	0.243	0.048	0.053	0.580	1.770	16.68	»
(32)	0.070	0.232	0.040	0.063	0.957	2.740	17.24	»
(33)	0.193	0.315	0.026	0.062	0.256	0.980	17.50	»
(34)	0.345	0.280	0.038	0.043	0.375	0.875	19.56	»
(35)	0.294	0.280	0.044	0.063	0.530	0.965	19.88	»
(36)	0.158	0.210	0.024	0.045	0.435	»	20.52	»
(37)	0.289	0.175	0.028	0.048	0.335	0.712	20.74	»
(38)	0.135	0.186	0.043	0.051	0.375	0.660	20.88	»
(39)	0.293	0.243	0.062	0.054	0.530	0.715	21.16	»
(40)	0.105	0.210	0.046	0.059	0.320	0.430	21.84	»
(41)	0.273	0.232	0.043	0.052	0.455	0.560	22.08	»
(42)	0.095	0.093	0.018	0.048	0.230	»	22.64	»
(43)	0.248	0.232	0.048	0.063	0.480	0.210	22.80	»
(44)	0.287	0.292	0.040	0.088	0.360	0.588	23.06	»
(45)	0.455	0.350	0.032	0.047	0.665	0.284	23.26	»
(46)	0.850	0.469	0.034	0.026	1.415	»	23.35	»
(47)	0.482	0.292	0.008	0.037	0.453	»	23.40	»
(48)	1.453	0.350	0.037	0.040	0.384	2.715	23.40	»
(49)	0.300	0.232	0.046	0.031	0.267	0.530	23.73	»
(50)	0.343	0.221	0.040	0.058	0.506	»	24.04	»
(51)	0.415	0.232	0.008	non dosé	0.107	»	24.05	»
(52)	0.151	0.152	0.040	non dosé	0.312	»	24.06	»
(53)	0.206	0.232	0.037	0.079	0.266	»	24.20	»
(54)	0.185	0.140	0.063	0.078	0.435	»	24.40	»
(55)	1.047	0.373	0.025	0.058	0.512	2.489	24.52	»
(56)	0.640	0.268	0.011	0.048	0.088	»	24.61	»

Digitized by Google

DÉSIGNATION des échantillons d'aciers	COMPOSITION CHIMIQUE p. 100							
	Carbone	Silicium	Phosphore	Soufre	Manganèse	Chrome	Nickel	Fer
(57)	0.415	0.232	0.008	non dosé	0.107	»	24.65	non dosé
(58)	0.098	0.117	0.067	0.066	0.153	»	24.72	»
(59)	0.601	0.282	0.041	0.038	0.520	2.593	24.80	»
(59 *bis*)	0.105	0.210	0.046	0.059	0.320	0.430	24.84	»
(60)	0.617	0.409	0.020	0.024	0.800	»	25.25	»
(61)	0.587	0.140	0.018	0.019	0.880	»	25.27	»
(62)	0.328	0.232	0.016	0.027	0.430	»	25.38	»
(63)	0.079	0.093	0.075	0.069	0.230	»	25.84	»
(64)	0.063	0.058	0.013	0.019	0.077	»	26.34	»
(65)	0.233	0.175	0.016	0.048	0.182	»	27.12	»
(66)	0.626	0.243	0.021	0.047	0.414	2.535	27.16	»
(67)	0.251	0.140	0.016	0.038	0.364	»	27.72	»
(68)	1.509	0.373	0.046	0.049	0.512	5.420	28.16	»
(69)	0.129	0.315	0.043	0.052	0.435	5.934	28.28	»
(70)	0.105	0.186	0.029	0.043	0.572	0.555	28.80	»
(71)	0.110	0.163	0.073	0.051	0.650	»	28.82	»
(72)	0.670	0.315	0.065	0.061	0.588	14.632	29.32	»
(73)	0.322	0.292	0.023	0.043	0.409	»	29.76	»
(74)	0.209	0.292	non dosé	non dosé	0.537	1.309	29.88	»
(75)	1.690	0.409	0.029	0.046	3.848	1.524	29.92	»
(76)	0.093	0.292	0.016	0.015	0.315	»	30.44	»
(77)	0.155	0.198	0.024	0.040	0.358	»	31.04	»
(78)	0.745	0.350	0.028	0.049	0.884	2.570	31.30	»
(79)	0.048	0.221	non dosé	non dosé	0.702	5.478	34.48	»
(80)	0.195	0.175	0.016	non dosé	0.190	»	35.60	»
(80 *bis*)	0.169	0.198	0.008	0.039	0.448	»	35.20	»
(81)	0.215	0.140	0.015	0.021	0.563	»	36.88	»
(82)	0.437	0.292	0.038	0.049	0.702	2.556	42.16	»
(82 *bis*)	0.104	0.163	0.031	0.043	0.388	»	43.44	»
(83)	0.367	0.350	0.048	0.050	0.947	»	43.60	»
(84)	0.272	0.350	0.028	0.060	0.595	»	43.92	»
(85)	0.165	0.232	0.035	0.053	0.156	9.042	49.92	»
(86)	0.823	0.290	0.065	0.062	0.281	21.436	54.80(*)	22.24
(87)	0.135	0.292	0.032	0.042	1.254	14.209	72.13	11.91
(88)	0.329	0.527	0.031	0.055	1.066	3.696	84.00	10.296(*)
(89)	0.400	0.757	0.031	0 042	1.690	2.706	84.70	9.67(*)
(90)	0.270	0.280	0.024	0.050	0.414	5.500	15.48	non dosé
(91)	0.292	0.304	0.035	0.056	0.129	9.050	15.50	»
(92)	0.306	0.256	0.034	0.048	0.233	5.288	24.20	»
(93)	0.363	0.469	0.031	0.051	0.600	14.400	0.90	»
(94)	0.879	0.232	0.048	0.046	0.728	21.060	0.72	»
(95)	0.626	0.397	0.090	0.050	0.640	29.217	1.40	»
(96)	0.184	0.562	0.040	0.029	3.388	»	6.04	»
(97)	0.253	0.584	0.040	0.083	6.425	»	11.68	»
(98)	0.259	0.886	0.022	0.022	7.148	»	5.32	»
(99)	0.353	0.562	0.043	0.032	3.096	»	»	»
(100)	0.066	0.492	0.028	0.040	8.294	»	»	»
(101)	0.295	0.606	0.037	0.045	10.835	»	»	»
(102)	0.137	0.350	0.028	0.037	12.772	»	»	»
(103)	0.559	1.005	0.060	0.065	18.460	»	»	»
(104)	0.087	0.163	0.018	0.048	0.753	2.673	91.20	1.354
(105)	0.168	0.304	0.032	0.057	0.546	4.323	91.80	1.185
(105 *bis*)	0.366	0.315	0.001	0.021	2.052	6.814	87.23	non dosé
(106)	0.460	0.527	0.031	0.048	1.720	9.400	86.06	1.754
(107)	0.965	0.493	0.016	0.045	1.456	9.624	85.95	1.448
(108)	0.110	0.232	0.032	0.042	0.703	9.871	87.35	1.659
(109)	0.675	0.232	0.032	0.051	1.275	9.930	85.91	1.896
(110)	0.500	1.198	0.023	0.033	0.460	»	98.00	non dosé
(111)	0.500	0.262	0.030	0.060	3.730	»	92.30	»
(112)	0.308	0.355	0.011	0.067	8.856	»	89.72	»
(113)	0.350	0.663	0.018	0.040	13.554	»	85.40	»

(*) Teneur déterminée par différence.

Digitized by Google

Programme qui sera suivi dans l'exposé des propriétés physiques et mécaniques des aciers au nickel. — Les propriétés physiques et mécaniques des aciers, dont les compositions chimiques sont données au tableau I, seront étudiées successivement dans des groupes constitués comme suit :

1° Aciers au nickel ne contenant pas de chrome, et contenant des proportions de carbone et de manganèse très réduites ; nous les dénommons : *aciers au nickel proprement dits ;*

2° Aciers au nickel carburés, chromés et manganésés, qui se subdivisent en :

a) Aciers carburés ;

b) Aciers chromés ;

c) Aciers manganésés.

Notre exposé s'achèvera par une revue rapide des propriétés des aciers ou alliages à proportions de nickel très élevées.

PREMIÈRE PARTIE.

ACIERS AU NICKEL PROPREMENT DITS.

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES.

Choix d'échantillons formant une série d'aciers au nickel proprement dits. — Les aciers au nickel, non chromés, peu carburés et peu manganésés, du tableau I, forment une série à teneurs en nickel croissantes, comprises entre 6 et 43 p. 100, que nous considérerons comme échantillons types des aciers au nickel proprement dits.

Les aciers à teneurs en nickel à 6 p. 100, à très faibles proportions de carbone et de manganèse, sont très réfrac-

Digitized by Google

taires et, par suite, difficilement obtenus au creuset. D'autre part, Imphy n'a pas eu l'occasion de préparer au four Martin, où il serait facile de les obtenir, des aciers réalisant ces conditions, à teneurs comprises entre 1 et 5 p. 100 de nickel. Il en résulte une lacune au commencement de la série, mais elle n'entrave pas les recherches dont nous allons rendre compte, puisqu'elles ont pour objectif principal les propriétés des aciers au nickel à hautes teneurs.

Cette série d'aciers au nickel proprement dits ne comprend que des aciers à teneurs en nickel inférieures à 50 p. 100, d'une part parce que, dans les aciers ou alliages de fer et de nickel contenant plus de 50 p. 100 de nickel, les particularités révélées par l'étude des aciers au nickel à teneurs moindres semblent disparaître, de l'autre parce que les applications de ces alliages à hautes teneurs seront toujours restreintes, vu leur prix de revient élevé. Enfin, ces aciers ou plutôt ces alliages se préparent difficilement sans des proportions notables de manganèse, ce qui les éloigne des aciers au nickel proprement dits.

Les échantillons de la série ainsi constituée ont été soumis à des essais mécaniques, dans les conditions d'usage pour les réceptions par les contrôles de l'Etat ou des Compagnies de chemins de fer : essais à la traction, essais de pliage, essais de choc.

Propriétés mécaniques avant et après recuit. — *Essais à la traction avant recuit.* — Les échantillons ont été essayés à la traction au sortir du laminage avant recuit ; les résultats obtenus sont inscrits au tableau II :

Digitized by Google

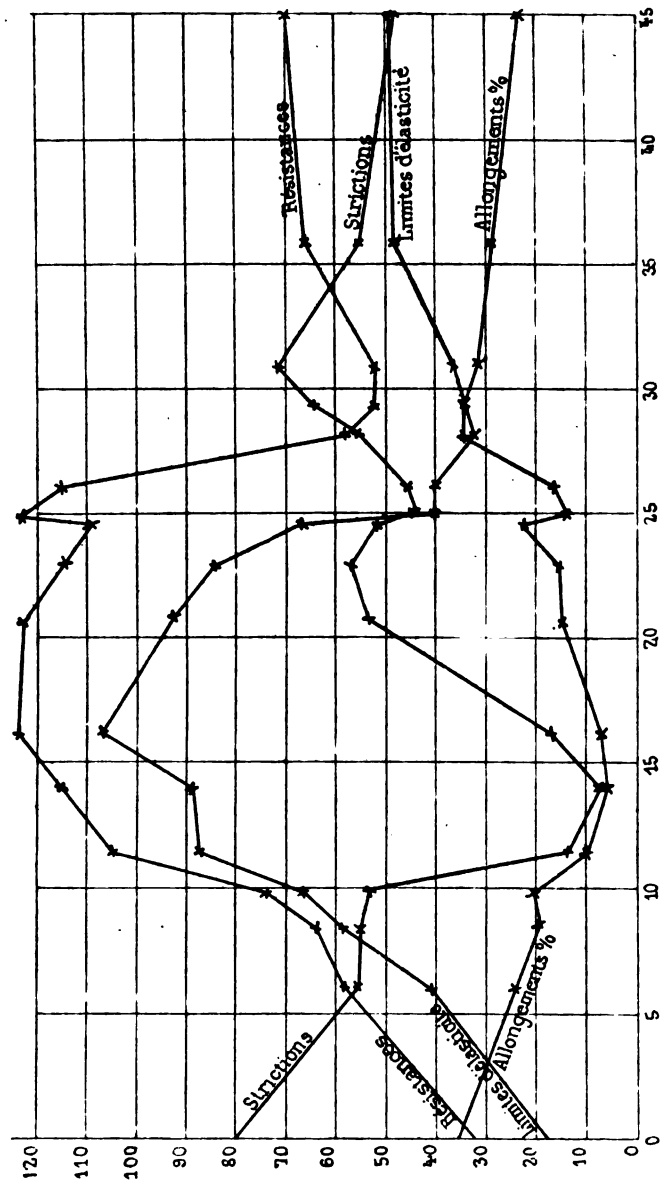


FIG. 1. — Aciers au nickel proprement dits. — Résultats des essais à la traction. Eprouvettes prélevées sur des barres laminées non recuites.

Digitized by Google

TABLEAU II.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS en nickel	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
		Limites d'élasticité par mm²	Résistances à la rupture par mm²	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
(7)	6.00	40k,9	58k,3	23.4	55.6
(9)	8.28	58 ,8	63 ,4	19.3	55.6
(10)	9.92	67 ,4	75 ,1	20.4	53.7
(14)	11.28	87 ,7	104 ,4	10.0	13.9
(17)	13.60	88 ,6	114 ,5	5.0	6.0
(26)	15.92	107 ,0	123 ,0	6.7	16.4
(36)	20.52	92 ,8	122 ,0	14.0	53.0
(42)	22.64	84 ,0	114 ,6	15.0	57.0
(54)	24.40	66 ,5	108 ,2	22.3	51.0
(58)	24 72	40 ,7	122 ,0	13.5	22.0
(63)	25.84	40 ,0	114 ,0	16.5	45.0
(67)	27.72	32 ,1	57 ,8	34.0	55.0
(71)	28.82	33 ,8	51 ,7	34.0	64.0
(76)	30.44	22 ,2	51 ,2	30.0	71.0
(80)	35.60	48 ,1	66 ,0	28.6	55.0
(84)	43.92	49 ,3	69 ,5	23.5	48.0

Ces divers résultats ont été réunis dans le diagramme *fig.* 1, dont les abscisses sont les teneurs en nickel, et les ordonnées soit les limites d'élasticité et les résistances à la rupture par millimètre carré en kilogrammes, soit les allongements à la rupture et les strictions en pourcentages.

L'examen de ce diagramme amène à distinguer, tout d'abord, dans les variations des propriétés mécaniques des aciers au nickel, deux périodes, l'une caractérisée par des limites d'élasticité élevées, des résistances à la rupture considérables et des allongements à la rupture faibles, l'autre par des limites d'élasticité peu élevées, très inférieures aux résistances à la rupture, et par des allongements à la rupture considérables. C'est l'échantillon (67) de notre série, à 27,72 p. 100 de nickel, qui accuse le commencement de la seconde période.

A ces deux périodes correspondent deux catégories d'aciers bien distinctes, la première comprenant des aciers à *haute limite d'élasticité* et petit allongement à la

Digitized by Google

rupture, la seconde des aciers à *basse limite d'élasticité* et grand allongement à la rupture. On voit sur le diagramme, à la fin de la première période, la limite d'élasticité et la résistance à la rupture faire une véritable chute, tandis que l'allongement se relève rapidement ; une transformation des plus considérables se produit dans la nature même de l'acier sous l'influence des dernières augmentations de la teneur en nickel, lorsque cette teneur devient voisine de 27 p. 100.

Cette transformation est mise en évidence non seulement par l'examen des résultats numériques et du diagramme, mais encore par l'examen des éprouvettes qui ont subi l'essai à la traction. L'acier, qui était devenu franchement dur, s'est transformé en une sorte d'acier doux, son grand allongement et sa limite d'élasticité peu élevée lui en donnent l'apparence, quoique sa résistance à la rupture reste plus élevée que celle de l'acier doux proprement dit. Pour abréger et pour mieux souligner le contraste qui existe entre leurs propriétés, nous aurons aussi recours quelquefois, dans la suite de cet exposé, pour distinguer ces deux types d'aciers si différents, aux désignations *acier dur* et *acier doux*.

Lorsque la limite d'élasticité est atteinte, l'acier du type dur soumis à la traction ne se déforme que dans la région de l'éprouvette où se produit la rupture, la striction ne se produit qu'en cette région, mais très forte relativement à ce que peut faire prévoir un allongement p. 100 aussi faible. Cet allongement provient tout entier d'une petite partie de la longueur de l'éprouvette ; c'est pourquoi, rapporté à toute la longueur de cette éprouvette, il apparaît peu important ; il est cependant considérable dans la région de la rupture et indique une ductilité remarquable.

L'acier du type doux, au contraire, lorsqu'il est soumis à la traction, commence à se déformer sous une charge très faible, 20 kilogrammes par millimètre carré et même

Digitized by Google

moins ; mais il a une tendance à l'écrouissage très prononcée, d'où un relèvement rapide de la limite d'élasticité partout où une déformation se produit. Il en résulte que la région qui s'est allongée la première cesse bientôt de s'allonger pour laisser les autres régions de l'éprouvette subir à leur tour une déformation qui relève de même leur limite d'élasticité. L'éprouvette s'allonge ainsi dans toute son étendue, même hors des repères et dans les têtes, malgré l'augmentation de la section, car le relèvement de la limite d'élasticité peut être assez grand pour compenser une importante réduction de section. Des déformations se produisent en plusieurs points de l'éprouvette, parfois simultanément, et se déplacent rapidement. Ce phénomène est encore beaucoup plus accentué pour certains aciers carburés et chromés, non magnétiques, que pour les aciers au nickel proprement dits.

La limite d'élasticité est basse, elle est même en réalité plus basse que ce qui est inscrit aux tableaux, car il est difficile de bien saisir le moment précis où commence la déformation permanente ; aussi les chiffres donnés pour cette limite sont-ils toujours un peu approximatifs.

L'allongement à la rupture de ces aciers provient de l'éprouvette tout entière, ce qui explique pourquoi il est si considérable, rapporté à la longueur primitive de cette éprouvette ; le pourcentage est beaucoup plus grand que celui qui correspondrait à l'allongement produit seulement dans la région de la rupture ; il n'est donc pas très comparable à l'allongement p. 100 à la rupture, tel qu'il est relevé pour les aciers à haute limite d'élasticité.

Par contre, la striction des aciers de ce dernier type n'est pas beaucoup plus faible que celle de l'acier à basse limite d'élasticité ; le pourcentage de la striction est loin d'augmenter dans la proportion du pourcentage de l'allongement à la rupture ; mais, ainsi que nous venons de le signaler, elle est très localisée. On voit que l'examen des

Digitized by Google

chiffres donnés par l'essai à la traction pour ces deux types d'aciers ne suffit pas pour donner une idée exacte de leurs ductilités relatives. Les conditions de l'essai sont à ce point de vue défavorables à l'acier à haute limite d'élasticité.

Nous insisterons particulièrement sur la distinction suivante : l'acier à basse limite d'élasticité s'écrouit fortement, tandis que l'acier à haute limite ne s'écrouit pour ainsi dire pas. Le premier se comporte à la traction comme le laiton, le cuivre, l'aluminium et autres alliages ou métaux écrouissables, tandis que le second se comporte comme l'acier au carbone demi-dur ou dur. On voit combien s'impose une première division des aciers au nickel en deux catégories.

Dans la première de ces catégories, des variations de teneurs assez faibles produisent d'importantes modifications des propriétés mécaniques ; ces propriétés subissent une véritable transformation lorsque la teneur en nickel se rapproche de 27 p. 100, transformation qui est bien mise en évidence par le diagramme (*fig.* 1) :

Jusqu'à l'échantillon (26), à 15,92 p. 100 de nickel, la limite d'élasticité et la résistance à la rupture s'élèvent régulièrement et progressivement, à mesure que la teneur augmente; les allongements à la rupture et les strictions diminuent parallèlement.

De l'échantillon (26) à 15,92 p. 100 de nickel à l'échantillon (36) à 20,52 p. 100, la résistance à la rupture se maintient très élevée, de même que la limite d'élasticité, qui s'abaisse cependant quelque peu ; la striction augmente rapidement.

De l'échantillon (36) à 20,52 p. 100 jusqu'à l'échantillon (67) à 27,72 p. 100 de nickel, la limite d'élasticité et la résistance à la rupture font, ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, une chute, pendant que l'allongement à la rupture se relève rapidement, et que la striction

Digitized by Google

continue à augmenter. La résistance à la rupture redevient ce qu'elle était à 6 p. 100 de nickel, et la limite d'élasticité s'abaisse plus bas encore.

De l'échantillon (67) à 27,72 p. 100 jusqu'à l'échantillon (83) à 43,92 p. 100 de nickel, catégorie que nous avons dénommée aciers à basse limite d'élasticité, les variations des propriétés mécaniques prennent une allure plus régulière, où s'accuse un relèvement lentement progressif de la limite d'élasticité et de la résistance à la rupture, accompagné d'une diminution lente de l'allongement à la rupture et de la striction, à mesure que la teneur en nickel augmente.

On peut donc distinguer, dans la catégorie aciers du type à haute limite d'élasticité, trois groupes, parmi lesquels le troisième : 20,52 à 27,72 p. 100 de nickel, se fait remarquer par une variation extrêmement rapide des propriétés mécaniques, surtout à l'approche du groupe suivant. Aussi avons-nous eu soin de procéder à des essais plus nombreux dans cette région particulièrement intéressante.

Un examen attentif des résultats inscrits au tableau montre que l'influence des petites variations de teneurs en carbone et en manganèse est loin d'être négligeable; il y a, sans doute, lieu de leur attribuer en grande partie les petits accidents des courbes de notre diagramme. Ainsi notamment les échantillons (53) et (63), 24,72 et 25,84 p. 100 de nickel, très peu carburés et peu manganésés, se font remarquer par leur dureté plus grande que celle de l'échantillon précédent (54), 24,40 p. 100 de nickel, notablement plus carburé et manganésé. On constatera plus loin, en étudiant des séries spéciales d'aciers au nickel carburés et manganésés, que les additions de carbone et de manganèse adoucissent les aciers au nickel lorsque leurs teneurs sont peu inférieures à 26 p. 100.

Par contre, la réduction de la proportion de carbone et

Digitized by Google

de manganèse à l'extrême minimum peut durcir beaucoup les aciers au nickel de ces mêmes teneurs. On en jugera par les résultats obtenus à l'essai à la traction avec l'acier (64) à 26,34 p. 100 de nickel, 0,063 de carbone et 0,077 de manganèse. Nous ne les avons pas inscrits dans le tableau II, parce qu'ils ne sont pas d'accord avec ceux que donnerait un acier au nickel normalement carburé et manganésé de même teneur en nickel. Ces résultats, obtenus avant recuit, sont :

Limite d'élasticité.....	54,8 kilogrammes
Résistance à la rupture.....	95,1 —
Allongement à la rupture.....	7,0 p. 100
Striction $\frac{S - s}{S}$	36,0.

Nous diviserons les aciers au nickel proprement dits en deux grandes catégories : aciers à haute et à basse limite d'élasticité ; puis en quatre groupes, dont les deux premiers, aciers de plus en plus durs, et le troisième, aciers à dureté atténuée, appartiendront à la première catégorie, tandis que le quatrième comprendra la deuxième catégorie tout entière.

Ces quatre groupes seront délimités comme suit :

1er groupe.	— Teneurs en nickel.....	0 à 15	p. 100
2e —	—	15 à 21	—
3e —	—	21 à 27	—
4e —	—	27 à 50	—

On verra ces quatre groupes se constituer à nouveau, dans la suite de l'exposé de ces recherches, pendant l'étude des propriétés autres que les propriétés mécaniques.

Essais à la traction après recuit. — Les résistances à la rupture et les limites d'élasticité sont pour certains échantillons très élevées ; il est intéressant d'essayer sur ces échantillons l'influence du recuit.

Recuit à haute température. — Les six premiers échan-

Digitized by Google

tillons de la série ont été recuits au rouge cerise clair, soit à 900° environ; ils ont donné les résultats suivants :

TABLEAU III.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS en nickel	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
		Limites d'élasticité par mm²	Résistances à la rupture par mm²	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
(7)	6.00	39k,5	52k,0	30.5	65.0
(9)	8.28	46 ,7	60 ,1	26.5	65.0
(10)	9.92	53 ,8	82 ,0	16.0	48.0
(14)	11.28	59 ,0	114 ,0	11.0	41.0
(17)	13.60	57 ,3	120 ,7	12.0	39.0
(26)	15.92	77 ,3	120 ,8	10.5	42.0

La comparaison de ces résultats avec ceux dont il a été déjà rendu compte (tableau II) montre que le recuit à 900° abaisse les limites d'élasticité. Mais, s'il réduit les résistances à la rupture lorsque la teneur en nickel reste inférieure à 9 p. 100, il les augmente notablement lorsque la teneur devient plus forte. Ce recuit augmente à toutes les teneurs l'allongement et la striction.

Les Aciéries de Saint-Étienne ont exposé, en 1894, à Lyon (*), une série très remarquable d'essais a la traction

(*) Nous extrayons de la notice publiée à l'Exposition de Lyon, par la Compagnie des Fonderies, Forges et Aciéries de Saint-Étienne, le tableau de résultats d'essais auxquels nous faisons allusion :

MARQUES	TENEURS EN			RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
	Carbone	Manganèse	Nickel	Contraction $\frac{S-s}{S} \times 100$	Limite élastique par mm²	Charge de rupture par mm²	Allongement p. 100 mesuré sur 100 mm.
A1	0.10	0.04	2.48	72.7	33.7	43.0	27.9
A2	0.09	0.04	5.93	71.5	41.4	50.5	25.6
A3	0.09	0.04	7.54	69.7	45.8	60.0	21.3
A4	0.08	0.04	10.06	62.0	52.2	77.0	13.7
A5	0.09	0.04	12.42	62.3	86.9	109.8	10.7
A6	0.08	0.04	15.09	44.8	98.4	118.6	6.8
A7	0.08	0.04	17.60	56.1	88.0	119.1	10.4
A8	0.09	0.04	19.96	61.0	85.4	115.4	9.7
A9	0.09	0.04	22.63	51.0	77.7	112.3	10.3
A10	0.10	0.04	25.15	54.3	54.4	102.4	16.4

Digitized by Google

d'aciers au nickel très peu carburés et peu manganésés recuits au rouge cerise mi-clair et refroidis dans le sable. Les résultats obtenus à Imphy concordent avec ceux qui ont été obtenus à Saint-Étienne; la loi suivant laquelle les résultats des essais varient avec la teneur en nickel est la même de part et d'autre. La limite d'élasticité s'élève et se rapproche de la résistance à la rupture, qui augmente très rapidement à mesure que la teneur en nickel augmente, de 0 à 15 p. 100 de nickel; cette dernière teneur correspond à l'allongement à la rupture le plus réduit et à la striction la plus faible. La résistance à la rupture se maintient élevée jusqu'à 20 p. 100 de nickel, tandis que la limite d'élasticité commence à s'abaisser et que l'allongement à la rupture et la striction commencent à augmenter. De 20 à 25 p. 100, la résistance s'abaisse lentement, la limite d'élasticité plus vite, et l'allongement à la rupture et la striction augmentent sensiblement. Malheureusement la série des Aciéries de Saint-Étienne s'arrête à 25 p. 100 de nickel, au moment où la grande perturbation allait se produire.

Recuit à basse température. — Les huit premiers échantillons de notre série soumis à un recuit au bois étincelant, soit à 400° environ, ont donné les résultats suivants :

TABLEAU IV.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS en nickel	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
		Limites d'élasticité par mm²	Résistances à la rupture par mm²	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
(7)	6.00	40k,0	53k,0	28.0	42.0
(9)	8.28	53 ,3	62 ,5	22.0	42.0
(10)	9.92	70 ,5	76 ,6	18.0	63.0
(14)	11.28	73 ,5	78 ,8	19.0	59.0
(17)	13.60	75 ,2	86 ,8	19.5	59.0
(26)	15.92	76 ,2	89 ,2	19.0	54.5
(36)	20.52	89 ,2	92 ,0	18.3	61.0
(42)	22.64	75 ,8	88 ,8	23.3	65.0

Digitized by Google

L'effet produit par ce recuit est, pour tous les aciers, un abaissement de la limite d'élasticité et de la résistance à la rupture et une augmentation de l'allongement à la rupture. Cet effet est beaucoup moindre que celui qui est produit par le recuit à 900° pour les teneurs en nickel inférieures à 9 p. 100 ; mais il est beaucoup plus grand pour les teneurs plus élevées.

C'est à ce recuit qu'il convient d'avoir recours pour adoucir les aciers au nickel de 10 à 22 p. 100. Imphy l'a constaté en 1895, sur un acier à 12,5 p. 100 de nickel (*).

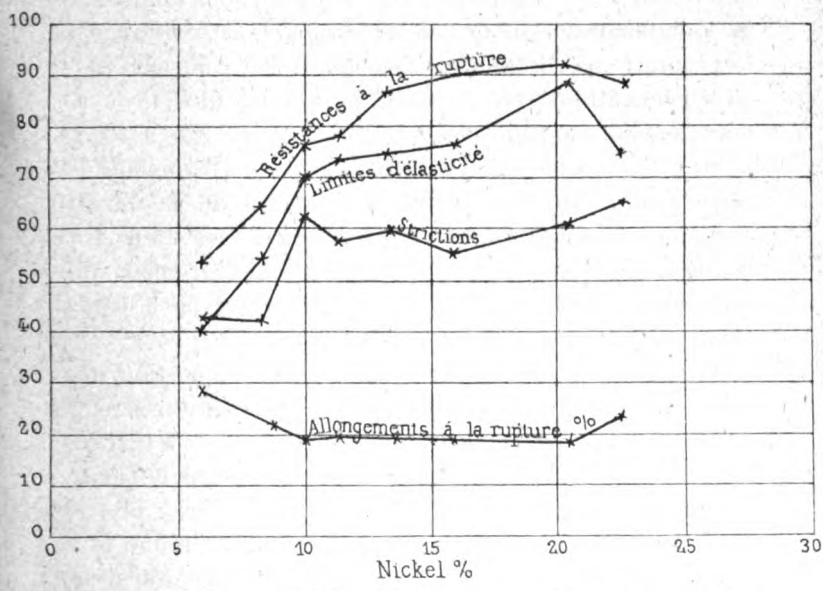


FIG. 2. — Aciers au nickel proprement dits. — Résultats des essais à la traction. Eprouvettes prélevées sur des barres laminées et recuites à 400°.

On remarquera que ce recuit permet d'obtenir de ces

(*) Voir le mémoire de M. Abraham (*Annales des Mines*, septembre 1898, p. 311).

Digitized by Google

aciers des résultats d'essais à la traction très remarquables ; il diminue considérablement la résistance, à la rupture sans beaucoup abaisser la limite d'élasticité, qui reste très voisine de la résistance. Au contraire, le recuit à 900° abaisse beaucoup la limite d'élasticité, et l'éloigne de la résistance à la rupture, en relevant même la résistance à la rupture pour certaines teneurs, ce qui doit le faire considérer dans une certaine mesure comme durcissant.

Le diagramme *fig.* 2, qui réunit les résultats du tableau IV, fait ressortir la régularité avec laquelle, sous l'influence de l'augmentation de la teneur en nickel, la résistance à la rupture et la limite d'élasticité se relèvent jusqu'à l'échantillon (26) à 15,92 p. 100 de nickel, et se maintiennent ensuite jusqu'à l'échantillon (36) à 40,52 p. 100, tandis que l'allongement à la rupture diminue et reste faible. Aussitôt après, l'atténuation de la dureté commence à se produire; c'est donc bien vers 21 p. 100 de nickel que commence le troisième des groupes que nous avons constitués, celui des aciers du type à haute limite d'élasticité, à dureté atténuée.

Nous aurons à revenir sur l'importante question des effets produits par le recuit à diverses températures.

Essais à la traction en travers. — Les essais à la traction dont il a été rendu compte sont des essais en long. Certains aciers à 12 p. 100, et même parfois à 5 p. 100 de nickel, ayant accusé une tendance à prendre une texture schisteuse, tellement prononcée qu'elle détruisait complètement la ténacité dans le sens perpendiculaire à celui du laminage, il était intéressant d'essayer à la traction des éprouvettes découpées dans le sens du travers dans des barres laminées. Des éprouvettes des six premiers échantillons de la série, recuites à 900°, ont donné les résultats ci-après :

Digitized by Google

TABLEAU V.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS en nickel	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
		Limites d'élasticité par mm²	Résistances à la rupture par mm²	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
(7)	6.0	40k,2	53k,5	28.3	65.0
(9)	8.28	46 ,8	60 ,2	25.0	61.0
(10)	9.92	66 ,5	79 ,8	17.6	49.7
(14)	11.28	101 ,0	108 ,9	10.7	32.2
(17)	13.60	120 ,5	122 ,0	9.3	31.6
(26)	15.92	98 ,9	119 ,0	11.7	40.9

Ces résultats diffèrent peu de ceux qui ont été obtenus avec des éprouvettes en long ayant subi le même recuit; ils démontrent que ces aciers n'ont aucune tendance à la schistosité comme les aciers à 12 p. 100 de nickel, carburés et chromés, des premières fabrications d'Imphy.

Essais de pliage statique. — Tous les aciers au nickel, quel que soit le groupe auquel ils appartiennent, plient à bloc sans se rompre, à l'épaisseur de 10 millimètres.

Pour les aciers du deuxième groupe les plus durs, il convient de recuire à 400° avant de faire le pliage; dans ces conditions, nous avons obtenu le pliage à bloc sans gerçures d'éprouvettes de $25^{mm} \times 10^{mm}$ provenant des sept premiers échantillons de la série.

On voit que les aciers au nickel, quoiqu'ils soient, dans certaines régions de la série, des aciers à limites d'élasticité et à résistances à la rupture très élevées, sont cependant tous très remarquables par leur ténacité aux essais statiques.

Essais de pliage par chocs. — L'essai de pliage par choc, prescrit par l'artillerie (Atelier de Puteaux), est la constatation du nombre de coups de mouton nécessaire pour plier une barrette maintenue en porte-à-faux. Le poids du mouton est de 10 kilogrammes; la hauteur de chute, de $0^{m},50$. Il était intéressant d'essayer dans ces

Digitized by Google

conditions les aciers au nickel les plus durs, pour lesquels la fragilité est particulièrement à redouter.

Avec des barrettes de $25^{mm} \times 10^{mm}$, le résultat des essais a été le suivant :

TABLEAU VI.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS en nickel	NOMBRE DE COUPS de mouton nécessaire pour plier la barrette à 80°
(7)	6.00	40 coups
(9)	8.28	40 —
(10)	9.92	70 —
(14)	11.28	80 —
(17)	13.60	70 —
(26)	15.92	125 — (rupture à 90°)
(36)	20.52	200 —

Essais de choc sur barrettes entaillées. — On voit que l'essai de pliage par choc accuse, comme les essais à la traction, une importante augmentation de la résistance à mesure que la teneur en nickel augmente. Mais les remarquables travaux de M. Frémont sur l'essai au choc ont démontré que l'effet produit par des chocs relativement faibles, répétés un grand nombre de fois, est loin d'être le même que celui d'un seul choc assez violent pour rompre les éprouvettes d'un seul coup, quelle que soit leur résistance. On sait que l'essai au choc tel que le pratique M. Frémont se fait au moyen d'un appareil qui enregistre le nombre de kilogrammètres nécessaire pour produire la rupture ; ce nombre mesure la fragilité beaucoup mieux que le nombre de coups de mouton. Les essais par chocs répétés se rapprochent sans doute trop des essais à l'état statique.

Les aciers au nickel à haute limite d'élasticité donnent des résultats très remarquables aux essais statiques ; cependant ils sont plus fragiles que les aciers doux ordinaires de bonne qualité, quoique beaucoup moins fragiles que les aciers au carbone de même dureté ; c'est ce que

Digitized by Google

démontrent les résultats des essais faits sur nos échantillons par la méthode de M. Frémont.

Les résultats obtenus par M. Frémont sont les suivants :

TABLEAU VII.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS en nickel	TRAITEMENTS subis	RÉSULTATS DES ESSAIS DE CHOC sur barrettes entaillées de 8 × 10 × 30 mm.
			kilogrammètres
(7)	6.00	non recuit	24
(9)	8.28	non recuit	22
(14 *bis*)	11.36	recuit à 400°	16
(17 *bis*)	14.00	recuit à 400°	21
(36)	20.52	recuit à 400°	8
(76)	30.44	non recuit	38
		recuit à 800°	36
(80 *bis*)	35.20	non recuit	40 + x (*)
		recuit à 800°	40 + x
(82 *bis*)	43.44	non recuit	30
		recuit à 800°	29

(*) 40 + x kilogrammètres signifie que l'appareil donnant son choc maximum, qui correspond à 40 kilogrammètres, n'a pas rompu la barrette, ce qui n'avait encore été obtenu par M. Frémont pour aucun acier et aucun métal.

Pour faciliter la comparaison de ces résultats avec ceux que donnent les aciers ordinaires, nous rappellerons que les aciers doux de bonne qualité donnent 25 kilogrammètres, et nous ferons connaître les résultats obtenus avec des aciers au carbone dans des mêmes conditions.

Imphy a préparé des éprouvettes de trois aciers dont nous donnons au tableau VIII la composition chimique. Nous inscrivons au tableau VIII *bis* les résultats qu'ils ont donné à l'appareil de M. Frémont.

TABLEAU VIII.

DÉSIGNATION des échantillons	COMPOSITION CHIMIQUE P. 100						
	Carbone	Silicium	Phosphore	Soufre	Manganèse	Nickel	Chrome
(*a*)	0.260	0.292	0.098	0.067	0.508	»	»
(*b*)	0.320	0.232	0.029	0.030	0.515	2.44	0.016
(*c*)	0.500	0.304	0.105	0.063	0.665	»	»

Digitized by Google

TABLEAU VIII *bis*.

DÉSIGNATION des échantillons	TRAITEMENTS subis par les échantillons	RÉSULTATS des essais de choc sur barrettes entaillées
		kilogrammètres
(*a*)	recuit à 850°.....	3
	trempé à 850°..... et recuit à 550°.....	12
(*b*)	recuit à 850°.....	3
	trempé à 850°..... et recuit à 550°.....	10
(*c*)	recuit à 850°.....	2.5
	trempé à 850°..... et recuit à 550°.....	4

Il est intéressant de comparer aux résultats des essais de choc les résultats donnés par ces aciers à l'essai à la traction. Ils sont inscrits au tableau VIII *ter*.

TABLEAU VIII *ter*.

DÉSIGNATION des échantillons	TRAITEMENTS subis par les échantillons	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
		Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
		kil.	kil.		
(*a*)	non trempé, non recuit.....	36	56	28	46
	trempé à 850° et recuit à 550°..	61	76	15	59
(*b*)	non trempé, non recuit.....	37	62	25	45
	trempé à 850° et recuit à 550°..	69	85	12	55
(*c*)	non trempé, non recuit.....	41	70	20	32
	trempé à 850° et recuit à 550°.	80	94	8	35

On voit que les aciers au nickel du type à haute limite d'élasticité sont beaucoup moins fragiles que les aciers au carbone de duretés correspondantes, même lorsqu'ils ont été trempés et recuits, et même lorsqu'ils contiennent 2 p. 100 de nickel et un peu de chrome, comme l'échantillon (*b*). D'autre part, les aciers au carbone sont très fragiles, lorsqu'ils n'ont pas été trempés et recuits à basse tempéra-

Digitized by Google

ture; or la trempe n'a pas sur des pièces de forte section la même action que sur des éprouvettes, ce qui donne un grand avantage aux aciers au nickel, puisqu'ils sont durs, même non trempés. Mais, par contre, les résistances au choc des aciers au nickel de cette catégorie n'atteignent pas celles des aciers doux ordinaires, quoique pour les aciers du premier groupe, 0 à 15 p. 100 de nickel, elles s'en approchent beaucoup.

Quant aux aciers au nickel du type à basse limite d'élasticité, ils font preuve d'une résistance tout à fait exceptionnelle, qui leur donne, au point de vue de la fragilité, une supériorité incontestable sur tous les alliages et métaux connus.

La distinction des aciers au nickel en aciers des types à haute et à basse limite d'élasticité se fait presque mieux, si possible, à l'essai au choc qu'à l'essai à la traction.

Effets de la trempe. — La trempe après chauffage au rouge cerise clair durcit peu les aciers du type à haute limite d'élasticité et adoucit considérablement les aciers du type à basse limite d'élasticité; elle accuse encore nettement le changement de nature qui se produit lorsque l'acier passe de la première de ces catégories à la seconde.

Nous avons jugé peu intéressant d'essayer à la traction après trempe les aciers à très haute limite d'élasticité, qui deviennent très secs, mais nous avons essayé dans ces conditions les aciers au nickel des troisième et quatrième groupes. Les résultats obtenus sont les suivants :

Digitized by Google

TABLEAU IX.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS nickel	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
		Limites d'élasticité par mm²	Résistances à la rupture par mm²	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
(36)	20.52	?	140k,8	8	24.0
(42)	22.64	?	126 ,0	15.5	11.0
(54)	24.40	61k,0	123 ,5	18.4	45.0
(58)	24.72	36 ,6	118 ,0	10.0	13.0
(63)	25.84	35 ,3	112 ,0	12.5	23.0
(67)	27.72	21 ,3	53 ,4	40.0	57.0
(71)	28.82	18 ,4	47 ,0	32.0	65.0
(76)	30.44	21 ,2	49 ,6	36.0	69.0
(80)	35.60	36 ,4	58 ,1	31.7	48.5
(84)	43.92	32 ,8	60 ,8	33.0	54.0

La comparaison de ces résultats avec ceux que donne le tableau II pour les mêmes échantillons, non trempés et non recuits, montre que la trempe durcit les aciers du troisième groupe, aciers durs à dureté atténuée, et adoucit beaucoup les aciers du quatrième groupe, aciers à basse limite d'élasticité.

Les Aciéries de Saint-Étienne ont donné parallèlement aux résultats d'essais après recuit, que nous avons rappelés ci-dessus, les résultats d'essais des mêmes échantillons soumis à la trempe à l'eau vive après chauffage au rouge cerise mi-clair, et non recuits ultérieurement (*). Ces

(*) Nous extrayons de la notice, déjà mentionnée ci-dessus, les résultats des essais obtenus à Saint-Étienne, sur des échantillons trempés :

MARQUES	TENEURS EN			RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
	Carbone	Manganèse	Nickel	Contraction $\frac{S-s}{S} \times 100$	Limite élastique par mm. carré	Charge de rupture par mm. carré	Allongement p. 100 mesuré sur 100 mm.
A1	0.10	0.04	2.48	77.6	46.1	59.7	18.5
A2	0.09	0.04	5.03	62.7	93.9	106.3	10.0
A3	0.09	0.04	7.54	59.9	110.5	122.0	9.0
A4	0.08	0.04	10.06	55.7	110.5	120.5	9.5
A5	0.09	0.04	12.42	57.7	114.2	124.6	9.6
A6	0.08	0.04	15.09	50.0	120.1	126.0	8.8
A7	0.08	0.04	17.60	46.8	112.5	122.8	8.3
A8	0.09	0.04	19.96	44.3	104.0	120.6	7.7
A9	0.09	0.04	22.63	41.9	80.1	115.7	8.6
A10	0.10	0.04	25.15	36.4	53.9	112.6	17.5

Digitized by Google

essais sont relatifs exclusivement à des aciers des trois premiers groupes que nous avons constitués, ils montrent, comme nos premiers résultats, que la trempe durcit quelque peu les aciers à haute limite d'élasticité.

On peut admettre que la trempe produit sensiblement le même effet que le recuit, c'est-à-dire que l'élévation de température qui précède la trempe, mais avec une action plus intense, sans doute parce qu'elle est plus brutale. Pour les aciers à basse limite d'élasticité, lorsqu'il y a lieu d'adoucir, par exemple entre des passes de tréfilage, on a généralement recours à la trempe de préférence au recuit, parce qu'elle agit immédiatement, tandis que le recuit exige du temps pour produire tout son effet.

Ces diverses constatations démontrent que, différant complètement en cela des aciers au carbone, les aciers au nickel se comportent à peu près de même à la trempe qu'au recuit. Les phénomènes auxquels donnent lieu ces traitements sont essentiellement différents de ceux qui sont constatés avec les aciers au carbone. Pour les aciers au nickel, l'action de la trempe paraît être, comme celle du recuit, exclusivement d'ordre physique, contrairement à ce qui se produit pour la trempe et le recuit des aciers au carbone. Dans le cas des aciers au carbone, la répartition du carbone, c'est-à-dire la composition chimique, est considérablement modifiée par ces traitements; c'est ce qui explique pourquoi l'effet de la trempe est immédiatement détruit par un chauffage à une température assez élevée pour permettre au carbone de revenir à l'état qu'il avait avant la trempe, tandis que l'état moléculaire résultant de la trempe est, pour les aciers au nickel et particulièrement pour les aciers du type à basse limite d'élasticité, tellement stable qu'il résiste à des chauffages répétés, et même s'accentue de plus en plus si on renouvelle le traitement plusieurs fois. Imphy trempe généralement ces aciers deux ou trois fois.

Digitized by Google

L'état moléculaire produit par la trempe est même difficilement détruit par un nouveau laminage à section moindre.

L'effet produit par la trempe sur ces aciers s'accuse à l'essai à la traction non seulement par l'abaissement de la limite d'élasticité et de la résistance à la rupture, et par l'augmentation de l'allongement à la rupture, mais encore par l'aspect des éprouvettes après qu'elles ont subi la traction. Les cassures des éprouvettes non trempées ont généralement un aspect dénommé *en fraise*, c'est-à-dire qu'elles présentent des arrachements en lignes convergeant vers le centre, lorsque la section de l'éprouvette est circulaire, tandis qu'après trempe leur aspect est uniforme. D'autre part, la surface cylindrique des éprouvettes d'aciers qui ont été trempés est rugueuse ; son aspect rappelle celui d'une peau écailleuse ; elle accuse des arrachements résultant du grand allongement qui se produit avant la rupture, arrachements qu'on n'observe pas sur les éprouvettes d'aciers non trempés.

On voit que les effets de la trempe mettent encore bien nettement en évidence les deux natures différentes des deux types d'acier déjà signalés. La trempe agit sur l'acier du premier type à peu près comme sur l'acier ordinaire, tandis qu'elle agit sur l'acier du second type à peu près comme sur le laiton, le bronze ou des métaux tels que le cuivre, le nickel, l'or, l'argent, etc...

Effets de l'écrouissage. — Les aciers du type à basse limite d'élasticité, ou ceux du type à haute limite d'élasticité très atténuée, peuvent seuls être étirés à froid à la filière. Les aciers à très haute limite d'élasticité ne peuvent guère subir le relèvement de limite d'élasticité qui est caractéristique de l'écrouissage, puisque leur limite d'élasticité est très voisine de la résistance à la rupture. Par conséquent, ils ne s'écrouissent presque pas. Nous l'avons déjà constaté en faisant l'examen des

Digitized by Google

éprouvettes rompues à la traction; et nous avons signalé en même temps les aciers au nickel du type à très basse limite d'élasticité comme particulièrement écrouissables. Cette propriété donne lieu à des constatations intéressantes.

Les effets de l'écrouissage produit par l'étirage d'une barre à la filière s'accusent comme suit à l'essai à la traction pour l'échantillon (67) à 27,72 p. 100 de nickel.

	LIMITE d'élasticité par mm. carré	RÉSISTANCE à la rupture par mm. carré	ALLONGEMENT p. 100 à la rupture	STRICTION $\frac{S - s}{S} \times 100$
	kil.	kil.		
Avant étirage.....	32,1	57,8	34,0	55,0
Après étirage.....	92,1	92,1	11,7	63,5

Le relèvement de la limite d'élasticité et la diminution de l'allongement à la rupture, qui sont les conséquences de la déformation à froid par étirage, se produisent aussi, quelle que soit la cause de cette déformation : compression, traction, forgeage par martelage ou à la presse, laminage, etc. Par ces traitements, la limite d'élasticité peut être élevée jusqu'à atteindre celle des aciers à haute limite d'élasticité et même à la dépasser en certains points. La constatation suivante le démontre : la résistance opposée à l'étirage à la filière par une barre à section carrée de 45 millimètres de côté, qui avait subi une première passe diminuant sa section de 1 millimètre environ, est devenue, à la seconde passe de même importance, assez grande pour faire rompre les quatre boulons de 30 millimètres de diamètre au moyen desquels s'exerçait l'effort de traction. La dureté était devenue à la surface semblable à celle des aciers au carbone trempés les plus durs.

La déformation à froid a pour conséquence, pour ces

Digitized by Google

mêmes aciers, comme pour tous les métaux et alliages écrouissables, la production de tensions intérieures; mais elles peuvent prendre une intensité extraordinaire. Elles se révèlent notamment au rabotage des barres écrouies; chaque enlèvement d'un copeau sur une face modifie les conditions de l'équilibre moléculaire, et cet équilibre se rétablit par un cintrage de la barre. Imphy a eu l'occasion de faire le rabotage d'une barre carrée de 40 millimètres écrouie; elle se cintrait à chaque passe de l'outil avec une intensité telle qu'elle ne pouvait que très difficilement être maintenue sur la raboteuse.

Ces tensions intérieures peuvent, par l'emploi d'un moyen de forgeage puissant, devenir assez fortes pour faire éclater le métal aux points les plus déformés, c'est-à-dire produire de véritables tapures, semblables à celles qui se produisent dans les aciers au carbone fortement trempés. Imphy a constaté ce phénomène en forgeant à froid à la presse à forger, sans recuits intermédiaires, un carré de 35 millimètres en carré de 25 millimètres.

Un recuit à 800°, d'une durée d'une heure environ, fait complètement disparaître ces tensions, et l'augmentation de la dureté disparaît en même temps. Il résulte même de la déformation à froid combinée avec le recuit un adoucissement plus grand que celui qui est causé par le recuit seul. L'expérience suivante le démontre :

Deux morceaux prélevés dans une barre de carré de 35 millimètres de côté ont été transformés en carré de 25 millimètres, le premier par un forgeage à chaud dans les conditions ordinaires du forgeage, le second par un forgeage à froid à la presse qui a été fait en quatre passes avec recuits intermédiaires au rouge cerise; ces quatre passes ont été reconnues nécessaires, le forgeage sans recuit intermédiaire faisant éclater le métal. Les deux carrés de 25 millimètres ainsi obtenus ont été recuits

Digitized by Google

ensemble au rouge cerise clair et refroidis lentement. Ils ont donné les résultats qui suivent à l'essai à la traction :

	LIMITE d'élasticité par mm. carré	RÉSISTANCE à la rupture par mm. carré	ALLONGEMENT p. 100 à la rupture	STRICTION $\frac{S - s}{S}$
	kil.	kil.		
1er barreau	35 à 40	79,5	41	58.1
2e barreau	33,6	73,5	47	63.6

On peut en conclure que la déformation à froid suivie d'un recuit est un moyen puissant d'adoucissement des aciers au nickel du type à basse limite d'élasticité.

La trempe produit cet effet sur les aciers de ce type, même si elle n'est pas suivie d'un recuit. Elle ne doit cependant pas être assimilée complètement au recuit, car elle produit des tensions intérieures beaucoup moins intenses, il est vrai, que celles de la déformation à froid, mais assez fortes pour se révéler nettement au rabotage d'une barre longue. Le recuit fait disparaître ces tensions.

On voit qu'il est possible de transformer en aciers au nickel durs les aciers à limite d'élasticité peu élevée, que nous avons dénommés parfois, pour abréger, aciers du type doux. Mais, tandis que les aciers à limite d'élasticité élevée, ou aciers du type dur, restent durs après recuit, c'est-à-dire après disparition des tensions intérieures irrégulièrement distribuées, comme celles que produit la trempe dans les aciers au carbone, les aciers à basse limite d'élasticité du type doux ne deviennent durs qu'avec existence de tensions intérieures très intenses, et même d'autant plus intenses que le durcissement a été plus grand.

Comme la trempe, lorsqu'elle produit le durcissement des aciers au carbone, l'écrouissage agit surtout sur les couches superficielles; il est, par conséquent, peu propre

Digitized by Google

à produire un grand durcissement pour les pièces ayant quelque épaisseur. En outre, l'existence des tensions intérieures favorise la fragilité; cependant nous avons constaté que ces aciers restent peu fragiles, même après une déformation permanente qui a relevé notablement leur limite d'élasticité. Ainsi l'essai au choc sur barrettes entaillées de M. Frémont a donné plus de 40 kilogrammètres avec un acier au nickel du type à basse limite d'élasticité, qui avait subi une importante déformation à froid par compression.

Ces constatations démontrent à nouveau que les propriétés mécaniques des aciers du type à basse limite d'élasticité ont beaucoup d'analogie avec celles des divers alliages ou métaux écrouissables; ils peuvent exister, comme le laiton (*), par exemple, à une infinité d'états intermédiaires entre l'état doux et l'état dur, ces deux états extrêmes se caractérisant comme suit :

État doux. — Il s'obtient par le recuit à 800° ou 900° ou par la trempe à cette même température, suivie ou non d'un recuit, ou encore par l'écrouissage suivi d'un recuit. Le recuit, lorsqu'il est suffisamment prolongé, fait disparaître les tensions intérieures, ce que ne produit pas la trempe. Seul le recuit ne paraît pas adoucir autant que lorsqu'il a été précédé d'une trempe ou d'un écrouissage.

Etat dur. — Il s'obtient par un écrouissage intense. La dureté est locale, et peut, par conséquent, être bien différente d'une pièce à l'autre du même acier, ou d'une région à l'autre de la même pièce. Elle est toujours

(*) M. le commandant Pralon, dans un mémoire *Sur les Essais à la traction des cuivres et laitons* (extrait de la *Revue d'Artillerie*, avril-juin 1898), rend compte (p. 14) d'essais à la traction d'une série d'éprouvettes de laiton soumises à des écrouissages de plus en plus intenses. On voit la résistance à la rupture et l'allongement à la rupture p. 100 passer progressivement de 30 kilogrammes par millimètre carré et 62,5 p. 100 à 64 kilogrammes par millimètre carré et 2 p. 100.

Digitized by Google

accompagnée de tensions intérieures intenses qui tendent à rendre l'acier fragile.

Ces constatations permettent de donner l'explication d'une anomalie apparente, la résistance à l'usinage à froid plus grande pour l'acier du type doux que pour l'acier du type dur. Nous admettons que la déformation produite par l'outil a pour conséquence un relèvement très considérable de la limite d'élasticité par écrouissage, et, par suite, une dureté très grande de la région en contact avec l'outil. Ce durcissement local peut élever la limite d'élasticité dans cette région plus haut que celle des aciers les plus durs du type à haute limite d'élasticité.

Ces observations confirment l'existence de deux types d'aciers de propriétés mécaniques bien différentes, types dont l'existence est déjà accusée par l'action de la trempe et démontrée par les résultats des essais à la traction, à la compression, au pliage et au choc.

Effets du corroyage à chaud. — Il est bon de faire remarquer que tous les essais dont nous avons rendu compte sont relatifs à des aciers laminés, et non à des aciers coulés. L'acier au nickel se figeant rapidement à la coulée, on abreuve difficilement les pièces moulées avec cet acier ; cependant l'emploi de l'acier au nickel sous cette forme est loin d'avoir été l'objet de tentatives suffisantes.

L'état moléculaire résultant du forgeage ou du laminage paraît être un état particulier sur lequel la température à laquelle est achevé le laminage a une grande influence, notamment lorsque l'acier est laminé en tôles minces. M. le chef d'escadron Mengin, chef de l'atelier de précision de la section technique à Saint-Thomas-d'Aquin, a attiré notre attention sur les résultats très remarquables qu'il a obtenus à l'essai à la traction avec des tôles de

Digitized by Google

3 millimètres d'épaisseur d'acier à 17 p. 100 de nickel qu'Imphy lui a livrées. La résistance à la rupture a atteint 170 kilogrammes par millimètre carré avec 16 p. 100 d'allongement à la rupture. Cette qualité remarquable était due au corroyage à température relativement basse. Les aciers au nickel paraissent très sensibles à cette sorte d'écrouissage à chaud.

TRANSFORMATIONS ALLOTROPIQUES

Etats allotropiques différents des aciers à haute et basse limite d'élasticité. — Les variations des propriétés mécaniques des aciers au nickel, qui se produisent lorsqu'on fait varier leur teneur en nickel, sont une des manifestations d'un phénomène des plus remarquables, la *transformation allotropique*, qui s'opère sous l'influence des variations de la température.

L'*état allotropique* des aciers au nickel se modifie lorsqu'ils sont portés successivement à des températures assez élevées et assez basses pour que leur *point de transformation* soit compris entre ces deux températures. Le point de transformation est la température à laquelle la transformation commence à se produire sous l'influence du refroidissement, ou cesse de se produire sous l'influence de l'échauffement.

La position du point de transformation varie sur l'échelle des températures avec la teneur en nickel; elle s'abaisse à mesure que cette teneur augmente. C'est pourquoi l'état allotropique des aciers au nickel de teneurs diverses est différent, suivant que la température à laquelle il est constaté est inférieure ou supérieure à celle du point de transformation.

Nous avons rendu compte d'essais mécaniques qui ont été effectués à la température de + 15° environ, tempé-

Digitized by Google

rature ordinaire de notre climat du Centre de la France; c'est dans le voisinage de cette température qu'est situé le point de transformation au refroidissement des aciers dont la teneur en nickel, 27 p. 100, est signalée comme passage du type à haute limite d'élasticité au type à basse limite.

Dans les régions arctiques, ce passage se ferait à une teneur en nickel plus élevée, et dans les régions équatoriales il se ferait à une teneur plus basse.

Les deux expériences suivantes, entre autres, montrent comment la transformation allotropique se manifeste par d'importantes modifications des propriétés mécaniques.

L'une de ces expériences est due à M. Osmond (*) : des barrettes d'acier au nickel du type doux sont placées entre les mâchoires garnies d'amiante d'un étau, et sont refroidies dans un bain réfrigérant : il suffit de tâter l'acier à la lime pour constater que la transformation allotropique est accompagnée d'une grande augmentation de la dureté.

L'autre expérience a été imaginée par M. Ch.-Ed. Guillaume; elle s'applique aux aciers du type à haute limite d'élasticité et se réalise facilement avec les aciers dont la teneur est comprise entre 15 et 25 p. 100 de nickel. Nous l'avons reproduite à Imphy avec un acier à 16 p. 100 de nickel.

Cette expérience consiste à soumettre à l'opération du tournage, sur un tour ordinaire, un échantillon, qui a été chauffé à une température de 700° environ, et a été mis sur le tour, avant que sa température se soit abaissée au-dessous de 150°. Dans ces conditions, l'acier à 16 p. 100 de nickel se révèle doux au tournage, et subit facilement des passes d'outil en donnant de beaux copeaux.

(*) *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXVIII, p. 532, mars 1894.

Digitized by Google

Si on approche un aimant de cet échantillon, pendant qu'il se laisse ainsi usiner, on constate qu'il n'est pas attirable, non plus que les copeaux qui s'en détachent. Par contre, on constate que ces copeaux, qui se refroidissent rapidement en raison de leur faible épaisseur, deviennent bientôt magnétiques.

L'opération du tournage se poursuit ainsi facilement pendant quelque temps, et se poursuivrait de même encore pendant longtemps si on avait soin de maintenir la température de l'échantillon au-dessus de 150°, par exemple en le chauffant au moyen d'une lampe à alcool. Mais, si on laisse la température s'abaisser, on entend bientôt un grincement produit par l'outil, qui devient rapidement très fort ; les copeaux deviennent cassants, le tournage ne se fait plus dans de bonnes conditions, et ne peut plus être continué avec la même rapidité. L'acier est devenu dur et sec ; en approchant l'aimant, on constate qu'il est devenu magnétique.

Le passage de l'état doux ou non magnétique à l'état dur ou magnétique s'est fait vers 150°, si la teneur en nickel de l'échantillon est de 16 p. 100.

L'apparition ou la disparition du magnétisme coïncide pour les aciers au nickel avec des modifications profondes de leurs propriétés mécaniques ; c'est ce qui explique comment les métallurgistes ont été amenés à comprendre dans leurs recherches la détermination des *points de transformation magnétique*, c'est-à-dire des points de l'échelle des températures où le magnétisme apparaît au refroidissement et disparaît à l'échauffement. En effet, la variation de l'état magnétique est beaucoup plus facile à constater que celle des propriétés mécaniques.

Travaux antérieurs. — La première publication relative à ces transformations allotropiques est due à J. Hop-

Digitized by Google

kinson ; il a fait connaître, en décembre 1889 (*), les propriétés très remarquables d'un échantillon d'acier au nickel à 25 p. 100 préparé par M. J. Riley dans les usines de la Société « Steel of Scotland », à Glasgow. Cet acier, non magnétique à la température ordinaire, devenait magnétique lorsque la température s'abaissait un peu au-dessous de 0°, et très magnétique à la température de — 51°. En revenant à la température ordinaire, il restait magnétique et ne cessait de l'être qu'à 580°. Cet acier pouvait donc exister entre la température ordinaire et 580° à deux états : l'état non magnétique et l'état magnétique.

La *fig.* 3 résume les constatations de J. Hopkinson.

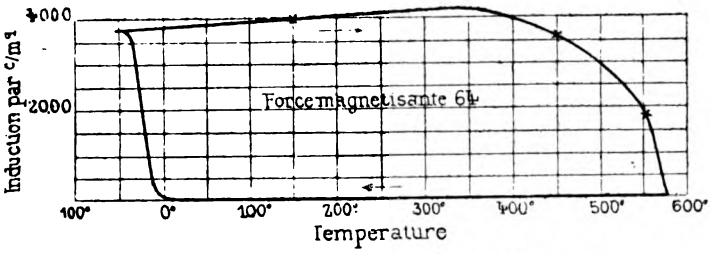


Fig. 3. — Expériences de J. Hopkinson.

Dans une communication de janvier 1890, J. Hopkinson faisait connaître qu'à ces deux états correspondent des résistances électriques différentes, et des propriétés mécaniques différentes l'échantillon magnétique ayant la résistance à la rupture la plus élevée et l'allongement à la rupture le plus faible.

A la même époque, M. H. Le Châtelier (**) arrivait à la même conclusion par l'étude des résistances électriques.

M. Osmond (***) déterminant, pour plusieurs échantillons

(*) Communication, du 2 décembre 18*9, à la Société royale de Londres.

(**) *Comptes Rendus*, t. CX, p. 283, 10 février 1890.

(*8*) *Comptes Rendus*, t. CXVIII, p. 532, mars 1894.

Digitized by Google

d'aciers au nickel de teneurs diverses, préparés par M. R.-A. Hadfield, la position des points de transformation qui se manifestent pendant le refroidissement, a constaté que la transformation subie vers 0° par les aciers au nickel à 25 p. 100 de nickel, découverte par MM. Hopkinson et H. Le Châtelier, n'est qu'un cas particulier d'une loi plus générale : les points de transformation des aciers au nickel s'abaissent à mesure que la teneur en nickel s'élève jusqu'à atteindre une température inférieure à 0°, ainsi que l'avaient déjà constaté MM. J. Hopkinson et H. Le Châtelier.

M. Osmond signale aussi dans la même note qu'un échantillon à 29,07 p. 100 de nickel, presque non magnétique à la température ordinaire, le devient notablement, mais seulement d'une manière temporaire, à —70°. Un échantillon à 49,65 p. 100 de nickel est magnétique à la température ordinaire.

M. Ch.-Ed. Guillaume, étudiant une série d'aciers au nickel préparée par Imphy à son intention, a déterminé les points de transformation au refroidissement et à l'échauffement d'un grand nombre d'échantillons de teneurs comprises entre 0 et 45 p. 100 de nickel.

Il a établi définitivement que les points de transformation des aciers au nickel s'abaissent progressivement à mesure que la teneur en nickel s'élève, mais seulement jusqu'à 25 p. 100 environ ; au delà, les points de transformation se relèvent. Mais la transformation change de nature ; après avoir été irréversible, elle devient réversible. De 0 à 25 p. 100, à mesure que la teneur en nickel s'élève, le point de transformation au refroidissement s'abaisse beaucoup plus rapidement que le point de transformation à l'échauffement, de telle sorte que ces deux points s'écartent de plus en plus l'un de l'autre. On voit ainsi s'augmenter de plus en plus l'étendue de la région de l'échelle des températures pendant laquelle l'acier peut

Digitized by Google

exister à deux états allotropiques différents, comme l'ont signalé J. Hopkinson et M. H. Le Châtelier pour l'acier à 25 p. 100 de nickel. Lorsque la teneur en nickel dépasse 25 p. 100, la transformation allotropique devient brusquement réversible d'une manière presque absolue.

Les études de M. Guillaume sur diverses propriétés physiques des aciers au nickel, telles que la dilatation, la densité, l'ont, aussi bien que ses études spéciales des propriétés magnétiques, amené à considérer comme fondamentale la division des aciers au nickel en deux groupes, les irréversibles et les réversibles, c'est-à-dire ceux qui accusent la transformation irréversible et ceux qui accusent la transformation réversible. On remarquera que cette distinction fondamentale est précisément celle qui ressort de notre étude des propriétés mécaniques d'une série d'aciers au nickel à teneurs croissantes. Les aciers à haute limite d'élasticité et haute résistance à la rupture sont les irréversibles, et les aciers à basse limite d'élasticité et grands allongements les réversibles. On voit quelle est, pour le métallurgiste, l'importance de l'étude des transformations allotropiques, et notamment celle de la transformation irréversible. Nous aurons à revenir sur les travaux de M. Guillaume relatifs aux conditions dans lesquelles se fait cette transformation irréversible.

M. Osmond a formé une série complète d'aciers au nickel de teneurs variant de 0 à 100 p. 100, en réunissant aux échantillons préparés par M. Hadfield, et déjà étudiés par lui, une partie de ceux que nous avons préparés nous-mêmes à Imphy pour les études de M. Guillaume, et d'autres échantillons à teneurs en nickel supérieures à 50 p. 100 préparés à Denain par M. Werth. Il a déterminé leurs points de transformation à l'échauffement et au refroidissement (*).

(*) *Comptes Rendus*, t. CXXVIII, p. 306, janvier 1899.

Digitized by Google

Cette étude, qui réunit tous les travaux antérieurs, a été résumée par M. Osmond dans un diagramme que nous reproduisons ci-après (*fig.* 4).

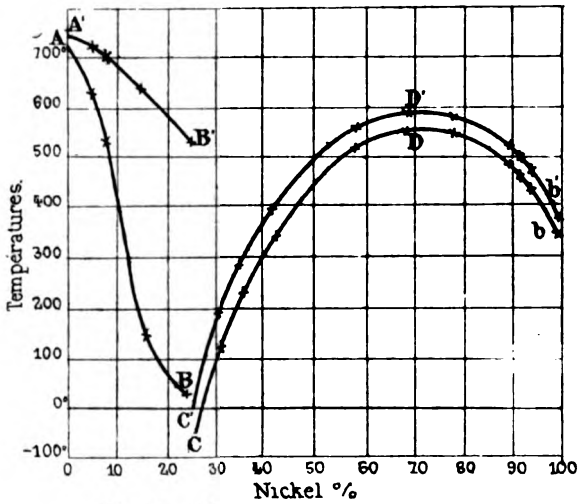


Fig. 4. — Expériences de M. Osmond.

Ce diagramme met très clairement en évidence l'abaissement des points de transformation du fer sous l'influence des additions de nickel, et la transformation allotropique irréversible de plus en plus accentuée, à mesure que la teneur en nickel augmente. Au-delà de 25 p. 100, la transformation allotropique devient réversible.

D'autre part, le fer additionné au nickel relève rapidement les points de transformation du nickel jusqu'à ce que la teneur en nickel soit réduite à 70 p. 100 ; après quoi les points de transformation s'abaissent pour atteindre 0° environ lorsque la teneur en nickel se réduit à 26 p. 100.

Digitized by Google

RECHERCHES NOUVELLES

Aciers subissant concurremment les transformations irréversible et réversible. — Les travaux que nous venons de résumer établissent que les aciers au nickel doivent être divisés en deux catégories, suivant que leurs teneurs en nickel sont inférieures ou supérieures à 26 p. 100, division qui s'impose non seulement parce que les propriétés mécaniques de ces aciers se modifient lorsque leur teneur franchit cette limite, mais encore parce qu'il en est de même pour la plupart de leurs propriétés physiques.

Mais pourquoi l'abaissement du point de transformation au refroidissement, qui rend non magnétiques vers 0° les aciers dont la teneur en nickel atteint 26 p. 100, est-il suivi d'un relèvement immédiat du point de transformation au-delà de 26 p. 100, avec modification des conditions de la transformation allotropique, qui d'irréversible devient réversible ? C'est ce que nous avons cherché à élucider.

Nous avons été mis sur la voie par une constatation que nous avons eu l'occasion de faire en procédant à des réfrigérations dans l'air liquide au laboratoire de M. d'Arsonval, à qui nous devons d'avoir pu abaisser la température dans nos expériences de refroidissement jusqu'à — 188°, ce dont nous lui exprimons notre vive gratitude. Un échantillon à 27,72 p. 100 de nickel a présenté cette particularité d'être successivement : à peu près non magnétique à la température ordinaire, magnétique réversible dans la neige carbonique, et magnétique irréversible dans l'air liquide. Nous avons signalé ce fait dans une communication à l'Académie des Sciences en juin 1899 (*).

(*) *Comptes Rendus*, t. CXXIX, p. 42.

Digitized by Google

D'autre part, nous avons remarqué que MM. Dewar et Fleming (*), et après eux M. Osmond (**), ayant immergé dans l'air liquide un acier à 29,07 p. 100 de nickel, ont constaté qu'il subissait la transformation irréversible. Or, cet échantillon avait été signalé antérieurement par M. Osmond (***) comme subissant la transformation réversible à basse température.

Il fallait en conclure que certains aciers, ayant une teneur en nickel supérieure à 26 p. 100, et appartenant par toutes leurs propriétés à la catégorie des aciers réversibles, deviennent cependant des aciers irréversibles lorsqu'ils sont soumis à un refroidissement suffisamment intense. C'est ce qui a attiré notre attention sur l'intérêt particulier que présente la recherche des positions des points de transformation allotropique des aciers au nickel dont les teneurs en nickel sont voisines de 26 p. 100, teneur considérée jusque-là comme la limite qui sépare les aciers réversibles des irréversibles. Nous avons déterminé les points de transformation magnétique d'une série d'échantillons, encadrant la teneur de 26 p. 100, assez nombreux pour permettre d'élucider dans quelles conditions se fait le passage de la transformation irréversible à la transformation réversible.

Procédés employés pour les déterminations de points de transformation allotropique. — L'apparition et la disparition du magnétisme se constatent facilement, lorsqu'elles se produisent à une température peu éloignée de la température ordinaire, au moyen d'un aimant mis en contact avec l'échantillon porté dans un bain d'eau ou d'huile à une température déterminée qui peut être facilement constatée avec un thermomètre. Quelques tâtonnements

(*) *Proc. Roy. Soc.*, t. LX, 1896.
(**) *Comptes Rendus*, t. CXXVIII, p. 1396.
(***) *Comptes Rendus*, t. CXVIII, p. 532, mars 1894.

Digitized by Google

ont permis, en employant ce procédé simple, d'obtenir, avec une précision suffisante pour ces recherches, les points de transformation compris entre 0° et 200°.

Pour abaisser la température au-dessous de 0°, et jusqu'à — 78°, Imphy a employé un bain d'éther refroidi par la neige carbonique, l'état magnétique des échantillons étant toujours constaté par leur contact avec un aimant. La position des points de transformation a ainsi pu être établie à une dizaine de degrés près, ce qui est généralement suffisant.

Entre — 78 et — 188°, les réfrigérations ont été faites par M. d'Arsonval, dans son laboratoire, en immergeant les échantillons dans l'air liquide. Ce mode de réfrigération intense a permis de produire la transformation des aciers qui ne sont pas transformés par la neige carbonique, et en même temps de constater que leur transformation se produit à une température comprise entre — 78 et — 188°. Dans certains cas, le séjour dans l'air liquide a dû, pour produire la transformation, être plus prolongé que dans d'autres cas ; nous en avons conclu que la transformation se produisait alors à une température plus basse, c'est-à-dire plus rapprochée de — 188°.

Pour la détermination des points de transformation situés au-dessus de 200°, nous avons eu recours à la méthode employée notamment par M. Osmond et par Mme Curie. Nous avons adopté, en le modifiant quelque peu, l'appareil décrit par Mme Curie dans son mémoire classique *Sur les propriétés magnétiques des aciers trempés* (*), appareil qui est une modification du four chauffé électriquement de M. Charpy.

L'installation d'Imphy se compose d'un tube en porcelaine vernissée intérieurement, de 0m,55 de longueur et 35 millimètres de diamètre extérieur. Il est entouré

(*) *Bulletin de la Société d'Encouragement*, 1898, t. III, p. 36.

Digitized by Google

d'une spire en fil d'acier au nickel NC-4 (*) d'Imphy, de 2 millimètres de diamètre, d'une longueur totale de 7 mètres, formant un solénoïde de 64 spires. L'acier au nickel NC-4 a sur le platine l'avantage de son prix beaucoup moindre, et sur le nickel pur, que nous avons aussi employé, conformément aux indications de Mme Curie, l'avantage de n'être pas magnétique, et d'avoir beaucoup plus de résistivité électrique. Sa valeur moindre est aussi à considérer, car le maintien prolongé d'une haute température détruit la cohésion du nickel aussi bien d'ailleurs que de l'acier au nickel, d'où des ruptures du fil qui obligent à changer de temps en temps la spire.

Cette spire reçoit un courant électrique qui produit le chauffage du tube et aimante le barreau placé dans le tube.

Pour le chauffage, le tube entouré de la spire est disposé dans la rainure d'une boîte en cuivre remplie d'amiante, recouverte d'une feuille de carton d'amiante, ce qui permet de retirer facilement le tube et de l'exposer à l'air, lorsqu'on détermine le point de transformation au refroidissement. Pendant le chauffage, le tube est soigneusement recouvert avec de l'amiante, et les deux extrémités sont fermées par des tampons d'amiante.

Le tube muni de la spire et la boîte en cuivre sont représentés *fig.* 5.

Une petite aiguille aimantée, montée sur pivot, est placée à côté du four, qui est orienté parallèlement à la direction que prend cette aiguille sous l'action du champ terrestre.

L'échantillon est introduit dans le tube sous forme de deux petites barrettes de $10^{mm} \times 8^{mm} \times 250^{mm}$ environ, entre lesquelles est placée la boucle d'un couple de pyro-

(*) La composition chimique de l'acier NC-4 sera donnée ultérieurement.

Digitized by Google

mètre Le Châtelier ; elles sont liées ensemble au moyen de fils de cuivre ou de fibres d'amiante. On connaît ainsi la température à laquelle est porté l'échantillon beau-

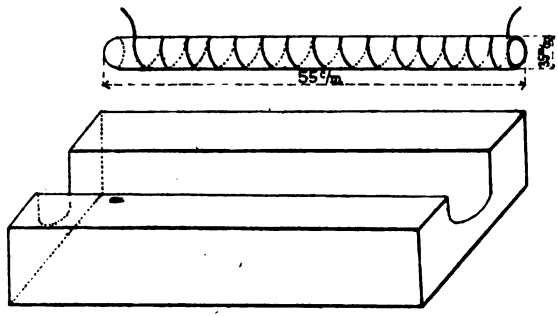


Fig. 5. — Four chauffé électriquement employé à Imphy pour les déterminations de points de transformation.

coup plus exactement que si la boucle du pyromètre était placée à côté de l'échantillon.

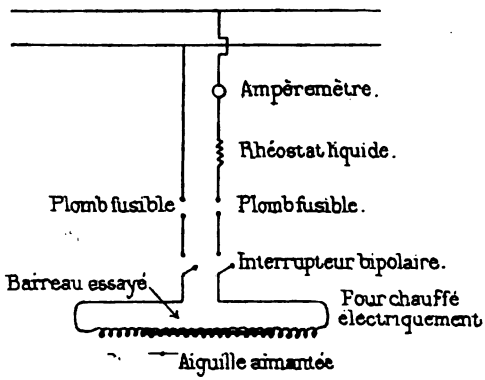


Fig. 6. — Schéma de l'ensemble de l'installation du four chauffé électriquement.

La *fig.* 6 donne le schéma de l'ensemble de l'installation.

On obtient avec un courant de 10 à 15 volts et 30 am-

Digitized by Google

pères aux bornes de la spire l'échauffement à 800° en vingt minutes.

Le refroidissement de 800° à 50° se fait en trente-cinq minutes environ.

Marche de l'expérience. — Si, après avoir placé un échantillon dans le tube, on fait passer le courant, on observe une déviation de l'aiguille aimantée produite par le champ magnétique du solénoïde. Ce champ magnétique ne produit qu'une déviation minime de l'aiguille lorsque le tube ne contient pas de barreau ou lorsque l'échantillon n'est pas magnétique, il est considérablement renforcé lorsque l'échantillon est magnétique ; l'aiguille placée en face d'un des pôles du barreau dévie de plus en plus et s'oriente à angle droit du champ terrestre, c'est-à-dire du four auquel ce champ est parallèle, lorsque l'échantillon est nettement magnétique.

Cet appareil permettant de constater l'état magnétique d'un échantillon à toute température comprise entre 200° et 1.100°, ou même 1.200°, on a pu observer comment se produit, dans ces limites de température, la transformation magnétique des aciers au nickel, soit à l'échauffement, soit au refroidissement. Il suffit en effet de noter la température à laquelle une déviation de l'aiguille commence à se produire pour connaître la position d'un point de transformation, c'est-à-dire, suivant la définition de M. Osmond, le point de l'échelle des températures où le magnétisme commence à apparaître au refroidissement, ou achève de disparaître à l'échauffement.

En général, la transformation magnétique ne se produit pas brusquement, elle se produit même parfois très lentement et progressivement entre deux limites de températures très éloignées ; cette marche de la transformation peut, dans certains cas, être suivie, jusqu'à un certain point, par l'observation du mouvement de l'aiguille aimantée, dont la déviation augmente avec l'intensité du champ

Digitized by Google

magnétique du solénoïde, jusqu'à ce que cette intensité soit suffisante pour maintenir l'aiguille à angle droit avec le champ terrestre; le champ du solénoïde est plus ou moins renforcé suivant l'état magnétique de l'échantillon placé dans le tube.

Résultats des déterminations. — Les résultats des déterminations sont inscrits au tableau X, où des colonnes distinctes sont réservées pour les positions des points de

TABLEAU X.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN			POSITIONS DES POINTS DE TRANSFORMATION			
				Irréversible		Réversible	
	Carbone	Manganèse	Nickel	à l'échauffement	au refroidissement	à l'échauffement	au refroidissement
(1)	0.166	0.026	0	820°	810° (*)	»	»
(6)	0.113	0.102	5.56	740°	620°	»	»
(10)	0.107	0.256	9.92	680°	440°	»	»
(20)	0.170	0.849	14.52	620°	145°	»	»
(36)	0.158	0.435	20.52	580°	80°	»	»
(42)	0.095	0.230	22.64	560°	150°	»	»
(50)	0.343	0.506	24.04	550°	60°	»	»
(58)	0.098	0.153	24.72	585°	75°	»	»
(63)	0.079	0.230	25.84	540°	25°	60°	50
(64)	0.063	0.077	26.34	530°	75°	»	»
(65)	0.233	0.182	27.12	475°	vers — 10°	95°	90°
(67)	0.251	0.364	27.72	425°	vers — 70°	95°	90°
(71)	0.110	0.650	28.82	410°	vers — 75°	100°	90°
(73)	0.322	0.409	29.76	»	»	110°	100°
(76)	0.093	0.315	30.44	375°	vers — 100°	90°	90°
(77)	0.155	0.358	31.04	»	»	110°	110°
(81)	0.215	0.563	36.88	»	»	265°	265°
(83)	0.367	0.947	43.60	»	»	355°	365°

(*) L'aiguille aimantée s'est mise en mouvement à 740° et a achevé son mouvement à 820°. Au refroidissement, après échauffement à 880°, elle s'est mise en mouvement à 810°, et a achevé son mouvement à 740°. En réchauffant à plusieurs reprises à 850°, après avoir refroidi à 650°, il a été constaté que les points de transformation s'abaissent de plus en plus, à mesure que l'opération est répétée. Les nouveaux résultats ont été les suivants :

2e détermination :	à l'échauffement	720° à 800°	au refroidissement	800° à 720°
3e	—	—	710° à 790°	—	790° à 710°
4e	—	—	700° à 785°	—	780° à 700°

Ces températures sont notablement plus élevées que celles qui ont été constatées par Mme Curie, à savoir: 745° à l'échauffement et 741° au refroidissement, pour un acier à 0.057 de carbone et 0.13 de manganèse ; mais ce désaccord laisse à nos déterminations leurs valeurs relatives.

Digitized by Google

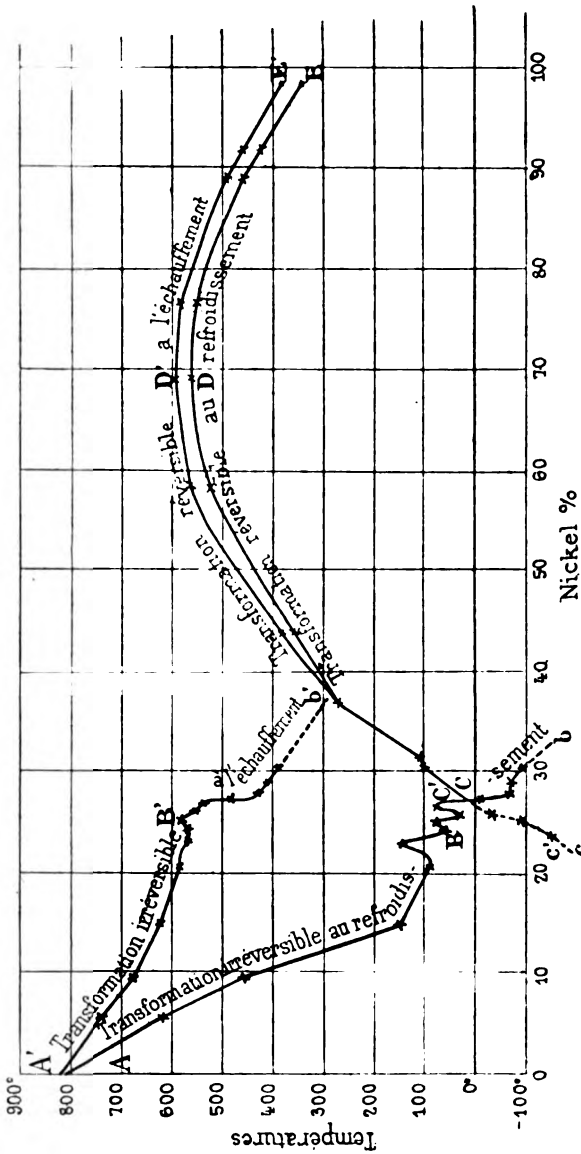


FIG. 7. — Positions des points de transformation allotropique des aciers au nickel à teneurs en nickel comprises entre 0 et 100 p. 100.

Digitized by Google

transformation irréversible et celles des points de transformation réversible.

Cette distinction se fait facilement, même lorsque la transformation réversible, se produisant la première sous l'influence du refroidissement, est suivie, à une température un peu plus basse, de la transformation irréversible se produisant dans le même échantillon. En effet, il suffit d'un échauffement de quelques degrés pour faire disparaître le magnétisme provenant de la transformation réversible, tandis qu'un relèvement de température de plusieurs centaines de degrés est nécessaire pour faire disparaître celui qui provient de la transformation irréversible.

Le diagramme ci-contre (*fig.* 7), établi avec les résultats de nos déterminations, dans les mêmes conditions que le diagramme de M. Osmond reproduit par nous (*fig.* 4), permet de faire plus facilement que sur le tableau X la discussion et l'interprétation des résultats. Les résultats relatifs aux aciers à teneurs en nickel supérieures à 50 p. 100 ont été empruntés aux mémoires de M. Osmond.

Un diagramme particulier donne, à plus grande échelle, (*fig.* 7 *bis*), les positions des points de transformation allotropique des aciers au nickel de teneurs comprises entre 20 et 30 p. 100, région dans laquelle les déterminations ont été faites beaucoup plus nombreuses, en vue de suivre de très près les transformations qui se produisent dans le même acier sous les deux formes, irréversible et réversible.

On remarquera que les diagrammes sont tracés sans tenir compte des points de transformation réversible des échantillons de teneurs en nickel inférieures à 30 p. 100. Nous dirons plus tard pourquoi.

Les prolongations de courbes tracées en traits interrompus sur ces diagrammes ont un caractère hypothétique; il convient de ne pas en tenir compte tout d'abord.

Digitized by Google

Nous examinerons successivement les courbes de la

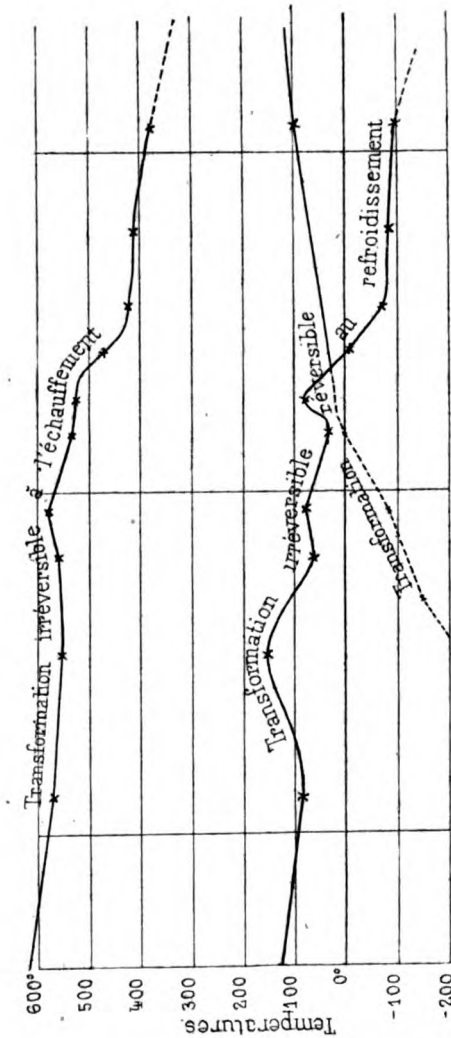


Fig. 7 *bis*. — Positions des points de transformation allotropique des aciers au nickel contenant de 20 à 30 p. 100 de nickel.

transformation irréversible et celles de la transformation réversible.

Digitized by Google

Positions des points de transformation irréversible. — L'abaissement progressif et régulier du point de transformation, à mesure que la teneur en nickel augmente, n'apparaît nettement à l'examen des résultats inscrits dans la première colonne du tableau (position des points de transformation à l'échauffement) que si on tient compte de l'influence très considérable du carbone et du manganèse, toujours présents en quelque proportion dans les aciers au nickel.

Nous rendrons compte ultérieurement de recherches relatives à des séries spéciales d'échantillons, destinées à mettre en évidence l'influence du carbone et du manganèse sur les positions des points de transformation magnétique des aciers au nickel; mais nous pouvons annoncer dès maintenant que ces recherches permettent bien d'attribuer à l'influence du carbone et à celle du manganèse l'abaissement relativement plus grand des points de transformation des échantillons (50), (65), (67), (73) et (77).

Ce sont, au contraire, leurs teneurs très réduites en carbone et manganèse qui expliquent le relèvement relatif des points de transformation des échantillons (42), (58) et (64). La position de ces points de transformation montre que l'influence des proportions les plus minimes de carbone et de manganèse est loin d'être négligeable.

L'examen des résultats inscrits dans la seconde colonne du tableau, positions des points de transformation irréversible au refroidissement, amène aux mêmes conclusions que pour les points de transformation à l'échauffement, à savoir l'abaissement progressif et régulier du point de transformation sous l'influence de l'augmentation de la teneur en nickel, déduction faite de l'abaissement produit par le carbone et le manganèse. Mais l'abaissement produit par les additions de nickel est beaucoup plus rapide

Digitized by Google

pour le point de transformation au refroidissement que pour le point de transformation à l'échauffement ; cet abaissement est très considérablement accéléré lorsqu'une proportion importante de carbone ou de manganèse ajoute son influence à celles du nickel; c'est le cas des échantillons (50), (65) et (67); il est, au contraire, notablement retardé, relativement à ce qui est constaté pour les aciers à teneurs en carbone et manganèse courantes, lorsque ces teneurs sont exceptionnellement réduites ; c'est le cas des échantillons (42), (58), (64) et (76).

On remarquera que l'écart entre le point de transformation à l'échauffement et le point de transformation au refroidissement, écart qui mesure l'intensité de l'irréversibilité, augmente rapidement jusqu'aux environs de 15 p. 100 de nickel, après quoi il se maintient à peu près constant.

De l'examen des deux premières colonnes du tableau, il résulte que les aciers au nickel peu carburés et peu manganésés, c'est-à-dire ceux que nous avons dénommés aciers au nickel proprement dits, accusent la transformation irréversible à toutes teneurs comprises entre 25 et 30,44 p. 100. Il est même bien vraisemblable que, si la transformation irréversible n'est pas produite par l'immersion de l'échantillon (77) à 31,04 p. 100 (*) et des échantillons suivants dans l'air liquide, c'est, d'une part, que la réfrigération n'est pas assez intense (de l'hydrogène liquide serait nécessaire), et, de l'autre, que les teneurs en carbone et manganèse de nos échantillons sont trop élevées.

On remarquera que l'échantillon (64), qui est exceptionnellement peu carburé et peu manganésé (C = 0,063, manganèse = 0,077), subit la transformation irréversible au refroidissement à + 75°, quoique sa teneur en nickel soit

(*) On verra plus loin que l'échantillon (77) a pu être transformé.

Digitized by Google

de 26,34 p. 100; c'est nettement un irréversible. Ce n'est donc pas 25 p. 100 de nickel qui est la limite de la catégorie d'aciers au nickel dénommés par M. Ch.-Ed. Guillaume irréversibles; cette limite est plutôt voisine de 27 p. 100 (*) lorsque le carbone et le manganèse sont réduits au minimum.

Mais on a constaté que l'échantillon (64) est, au point de vue mécanique, de qualité médiocre et ne peut pas être considéré comme un produit métallurgique bien normal. C'est ce qui explique pourquoi, jusqu'ici, les expérimentateurs n'ont eu à étudier que des échantillons quelque peu carburés et manganésés, pour lesquels la limite de la catégorie des aciers irréversibles est bien de 25 p. 100 environ.

On remarquera que, dans nos diagrammes, les courbes AB, A'B', du diagramme de M. Osmond, sont prolongées au-delà de la teneur de 25 p. 100 de nickel jusqu'à la teneur de 30,44 p. 100 jusqu'en *bb'*. Nous les avons même prolongées au-delà en traits interrompus, en prévision des constatations que permettra peut-être de faire un abaissement de la température au-dessous de — 188°.

Positions des points de transformation réversible. — Les deux dernières colonnes du tableau, consacrées à la transformation réversible, peuvent être examinées simultanément. En effet, l'écart accusé par le tableau pour le même échantillon, entre le point de transformation à l'échauffement et le point de transformation au refroidissement, est très faible, environ 10 degrés.

(*) Cette limite doit même être reportée au-delà de 30 p. 100 de nickel, si on en juge par le résultat obtenu par la Commission instituée par la Société d'Encouragement pour l'Industrie de Berlin, qui a obtenu un acier dur à 29,77 p. 100 de nickel et de 69,74 p. 100 de fer, grâce à l'absence presque complète de carbone et de manganèse (Voir *Bulletin de la Société d'Encouragement*, février 1897, p. 276).

Digitized by Google

Pour l'examen des résultats des déterminations de points de transformation réversible, nous suivrons les courbes du diagramme de droite à gauche, de manière à commencer par les points de transformation les plus élevés, ce qui équivaut à suivre l'ordre du tableau de bas en haut.

On sait que les points de transformation atteignent, vers 70 p. 100 de nickel, un maximum constaté par M. Osmond, et qu'ils s'abaissent ensuite régulièrement, à mesure que la teneur en nickel diminue; nos constatations le confirment.

L'influence du carbone et du manganèse est bien loin d'avoir la même importance que pour la transformation irréversible; elle n'est cependant pas nulle; on constatera plus loin qu'elle tend à relever légèrement les points de transformation. Elle permet d'expliquer l'abaissement du point de transformation de l'échantillon (76), 30,34 p. 100 de nickel, plus grand que celui des échantillons (73), (71), (67) et (65), 29,76, 28,82, 27,72 et 27,12 p. 100 de nickel, qui sont plus carburés et plus manganésés.

L'échantillon (64) n'accuse pas la transformation réversible, ou, du moins, ne l'accuse pas au refroidissement avant l'apparition de la transformation irréversible; mais on remarquera que cet échantillon est exceptionnellement peu carburé et manganésé, ce qui a pour conséquence un grand relèvement de son point de transformation irréversible au refroidissement, et tend, au contraire, à produire un abaissement de son point de transformation réversible. Il y a donc lieu, croyons-nous, d'admettre que le magnétisme produit par la transformation réversible est masqué par le magnétisme beaucoup plus intense de la transformation irréversible, ce qui se produit pour les aciers à teneurs en nickel plus élevées lorsque, par un refroidissement dans la neige carbonique ou l'air liquide, ils ont été transformés en subissant la transformation irréversible.

Digitized by Google

L'échantillon suivant (63) à 25,84 p. 100 de nickel, peu carburé et modérément manganésé, accuse la transformation réversible à + 50°, soit à une température un peu supérieure à celle à laquelle apparaît le magnétisme de la transformation irréversible.

Nous devons cependant signaler que, de 28,82 à 25,84 p. 100 de nickel, la transformation réversible se produit en deux phases : la première se manifeste par l'apparition d'un magnétisme très faible, qui ne permet pas la constatation bien précise de la position des points de transformation par les procédés employés à Imphy. La seconde phase, dont les points de transformation n'ont pas été inscrits au tableau, se manifeste par l'apparition d'un magnétisme beaucoup plus fort, quoique encore notablement plus faible que celui qui est produit par la transformation irréversible. Ayant principalement pour but de constater que, au-delà de 25 p. 100 de nickel, la transformation réversible et la transformation irréversible peuvent être produites successivement dans le même acier, lorsque la température varie entre des limites de températures étendues, nous n'avons pas cherché à préciser, ce qui aurait exigé des mesures quantitatives du magnétisme, à quelle température commence la seconde phase. C'est peut-être plutôt le commencement de cette seconde phase qui doit être considéré comme le véritable point de transformation; c'est pourquoi les courbes du diagramme ont été tracées dans la région 25 à 30 p. 100 de nickel plus bas que les températures inscrites au tableau, de manière à faire disparaître une sinuosité, d'aspect assez anormal, que les diagrammes accuseraient dans cette région. Cela revient à adopter, pour point de transformation, celui de la seconde phase et à ne pas tenir compte du premier.

Ces constatations nous permettent, croyons-nous, d'admettre que les additions de carbone et de manga-

Digitized by Google

nèse, en abaissant les points de transformation irréversible, font pour ainsi dire glisser le voile qui recouvre les points de transformation réversible, lorsque le premier de ces points de transformation est atteint au refroidissement avant le second. En effet, dans ce cas, la transformation réversible ne peut se manifester que par une légère augmentation du magnétisme de l'échantillon, magnétisme intense, produit par la transformation irréversible. Cette augmentation ne peut pas être mesurée par les procédés auxquels nous avons eu recours.

S'il en est ainsi, les aciers à teneurs en nickel inférieures à 26 p. 100 doivent accuser la transformation réversible, lorsque leur point de transformation irréversible est suffisamment abaissé par des additions de carbone et de manganèse. Les échantillons qui suivent réalisent ces conditions. Ils ont donné aux déterminations les résultats suivants :

TABLEAU XI.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN			POSITIONS DES POINTS DE TRANSFORMATION			
				Irréversible		Réversible	
	Carbone	Manganèse	Nickel	à l'échauffement	au refroidissement	à l'échauffement	au refroidissement
(61)	0.59	0.88	25.27	non transforme à — 78°		vers — 35° (*)	
(56)	0.64	0.88	24.61	non transformé à — 188°		« — 100° (*)	
(46)	0.85	1.41	23.35	non transformé à — 188°		« — 150°	

(*) Nous n'avons pas tenu compte de la transformation réversible de très faible intensité qui se produit à une température plus élevée, + 75° pour l'échantillon (61), — 25° pour l'échantillon (56), c'est-à-dire des points de transformation de la première phase.

La transformation réversible a pu être mise en évidence à la teneur en nickel de 23.35 p. 100, grâce à l'emploi de l'air liquide. A cette teneur réduite, la transformation

Digitized by Google

n'apparaît qu'à une température très basse, — 150° environ. La neige carbonique suffit pour produire la transformation de l'échantillon (61) dont la teneur en nickel est 25,27 p. 100.

Nous admettrons donc, quoique ce ne soit qu'une conséquence indirecte de nos expériences, que les aciers au nickel proprement dits, comme aussi ceux qui contiennent des proportions plus fortes de carbone et de manganèse, peuvent subir la transformation réversible, lorsque leur teneur en nickel est supérieure à 23 p. 100.

Cette teneur limite de 23 p. 100 serait vraisemblablement encore abaissée, si la réfrigération dans l'air liquide, qui produit la température de — 188°, était remplacée par une réfrigération encore plus intense, telle que celle de l'hydrogène liquide.

C'est pour tenir compte de ces constatations que nous avons prolongé en traits interrompus, vu leur caractère hypothétique, les courbes des points de transformation réversible de M. Osmond.

Nous n'avons tracé dans cette région qu'une seule courbe, puisqu'il ne peut être question de distinguer, étant donnés les procédés de détermination employés, les points de transformation à l'échauffement ou au refroidissement.

M. Ch.-Ed. Guillaume a donné, pour le calcul des positions de points de transformation réversible au refroidissement des aciers au nickel réversibles contenant de 27 à 40 p. 100 de nickel, la formule suivante :

$$T = 34,1\,(n - 26,7) - 0,80\,(n - 26,7)^2,$$

dans laquelle n indique la teneur en nickel en centièmes.

Les positions de points de transformation calculées avec cette formule concordent très bien avec celles qui ont été constatées dans nos déterminations, même lorsque la teneur en nickel est inférieure à 26 p. 100.

Digitized by Google

Les transformations irréversible et réversible sont des phénomènes distincts. — Ces constatations établissent que l'une ou l'autre des transformations irréversible et réversible peut être produite sans que sa production entraîne nécessairement celle de l'autre transformation.

Elles établissent encore que les positions de points de transformation ne dépendent guère, pour la transformation réversible, que de la teneur en nickel, tandis que, pour la transformation irréversible, elles dépendent plus encore des teneurs en carbone et en manganèse. Il en résulte que les deux sortes de transformations sont des phénomènes distincts et indépendants.

L'allure des courbes du diagramme (*fig.* 7) permet, croyons-nous, de les prolonger indéfiniment, conformément à notre tracé en traits interrompus, au-delà des points donnés par les déterminations. Les courbes des transformations irréversible et réversible atteignent ainsi des températures très basses, après s'être coupées. La position du point de croisement des courbes de points de transformation au refroidissement dépend des proportions de carbone et de manganèse que contiennent les aciers; elle ne peut donc pas être arrêtée avec précision, mais elle nous paraît être voisine de la teneur en nickel de 27 p. 100 pour les aciers à très faibles teneurs en éléments autres que le fer et le nickel. Les deux transformations se produisent alors à la même température au refroidissement.

La position du point de croisement des courbes des points de transformation à l'échauffement paraît devoir se produire à une teneur voisine de 38 p. 100 de nickel, et à la température de 280° environ; mais, à cette teneur, la transformation irréversible ne pourrait être produite que par un abaissement de la température, qui ne paraît guère réalisable.

Les modifications de propriétés mécaniques très consi-

Digitized by Google

dérables, qui ont été signalées comme des manifestations de la transformation allotropique, ne sont dues qu'à la transformation irréversible; la transformation réversible n'a pas d'influence bien appréciable sur les propriétés mécaniques des aciers. Il en résulte que le métallurgiste peut ne pas tenir compte de cette dernière transformation, qui n'a sur les propriétés mécaniques aucune action sensible, ni directement par elle-même, ni indirectement par une influence sur la transformation irréversible. Aussi consacrerons-nous la suite de cet exposé presque exclusivement à la transformation irréversible.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES RÉSULTANT DE LA TRANSFORMATION IRRÉVERSIBLE.

Variations de l'état allotropique des aciers au nickel sous l'influence des variations de la température. — La transformation irréversible, qui transforme la nature même de l'acier au nickel tellement que, physiquement sinon chimiquement, il devient un autre corps, ne se produit pas brusquement dès que la température du point de transformation est atteinte; elle est progressive entre des limites de température éloignées. C'est un phénomène complexe qu'il importe d'analyser le plus possible.

Cette transformation modifie la plupart des propriétés physiques autant que les propriétés mécaniques, à savoir l'état magnétique, la densité, la dilatation, la conductibilité pour la chaleur et l'électricité, etc.; elle peut donc être étudiée dans l'une quelconque de ses diverses manifestations; et nous aurons recours tour à tour, pour la suivre, aux propriétés mécaniques, à l'état magnétique et à d'autres propriétés physiques.

C'est par l'étude des variations de volume que le phénomène est analysé dans une remarquable expérience de M. Ch.-Ed. Guillaume, que nous rappellerons tout

Digitized by Google

d'abord (*). Il a constaté les variations de volume au refroidissement d'un acier au nickel à 15 p. 100 entre les limites de température + 200° et — 60°.

Nous reproduisons (*fig.* 8) le diagramme (**) que M. Guillaume a établi d'après les résultats qu'il a obtenus; il permet de suivre la marche progressive de la transformation sous l'influence du refroidissement.

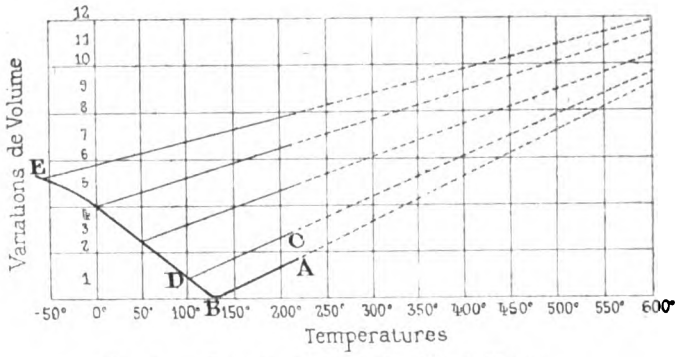


Fig. 8. — Expérience de M. Ch.-Ed. Guillaume.

De 200° à 130°, aucune transformation, rien d'anormal; le volume diminue conformément aux lois de la dilatation. Mais, au-dessous de cette température de 130°, le volume augmente, au contraire, constamment, malgré le refroidissement; la contraction produite en conséquence des lois de la dilatation est moindre que l'augmentation de volume produite par la transformation allotropique.

Si on arrête la transformation à une température quelconque, telle que 100°, au point D de la courbe qui représente la variation de volume de l'échantillon soumis à l'expérience, et si on laisse la température se relever, on voit le volume augmenter, conformément aux lois de la dilatation. Cette dilatation se fait avec un coefficient

(*) *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 7 mars 1898.
(**) *Bulletin de la Société d'Encouragement*, mars 1898, p. 273.

Digitized by Google

qui n'est pas le même qu'au point B. Semblable expérience, faite à des températures plus basses, accuse des coefficients de dilatation de plus en plus réduits à mesure que la température s'abaisse; il en est ainsi jusqu'en E, température de — 60°, limite de l'expérience. De B en E, le volume n'a pas cessé d'augmenter sous l'influence de la transformation allotropique.

M. Guillaume a suivi, encore dans les mêmes conditions, entre les limites de température moins éloignées, la transformation d'un acier à 24 p. 100 de nickel. La marche de la transformation est semblable, mais elle a cela de particulier qu'elle subit par moments des retards; pendant que la température s'abaisse d'une quinzaine de degrés, on ne constate aucune transformation, puis le mouvement correspondant à cette baisse de température se produit brusquement, et, en quelques secondes, le volume augmente de la même quantité que si l'augmentation s'était produite d'une manière continue. Nous reviendrons sur cet intéressant phénomène de la transformation par bonds; il n'a été constaté qu'aux très basses températures avec l'acier à 15 p. 100 de nickel.

Des coefficients de dilatation différents ont été constatés à des températures intermédiaires, pendant le cours de l'expérience, coefficients qui correspondent à des densités différentes; on doit on conclure que la transformation irréversible fait passer l'acier par une série d'états allotropiques intermédiaires, résultant du degré d'avancement de la transformation allotropique, qui se maintiennent lorsque la température se relève, d'où le qualificatif d'irréversible donné à cette transformation. M. Guillaume a constaté que, lorsque, par un relèvement de la température tel que celui qui est figuré au point B, l'acier a augmenté de volume suivant les lois ordinaires de la dilatation, il revient exactement au point B, lorsque la température s'abaisse de nouveau. L'irréversibilité est

Digitized by Google

donc complète lorsque les relèvements de la température ne sont pas très onsidérables.

Effets du refroidissement par la neige carbonique. — Il était donc intéressant de rechercher quelle est l'influence d'un refroidissement intense sur les propriétés mécaniques des aciers au nickel, ces propriétés mécaniques étant une des manifestations de l'état allotropique. Nous avons eu recours à la neige carbonique pour refroidir des éprouvettes d'essais à la traction, prélevées dans la même barre qu'une éprouvette non refroidie qui a été essayée à la traction comparativement.

L'essai comparatif a été fait sur des aciers non trempés et sur des aciers trempés. L'échantillon (52) a aussi été essayé à l'état recuit et l'échantillon (67) à l'état écroui par étirage à froid à la filière. Les résultats obtenus sont inscrits au tableau ci-après.

L'effet produit par l'immersion dans un bain refroidi par la neige carbonique est, pour tous les échantillons qui se sont transformés, un relèvement très considérable de la limite d'élasticité, une augmentation très grande de la résistance à la rupture et une grande diminution de l'allongement à la rupture. Le résultat est le même, que ces échantillons n'aient subi aucun traitement ou qu'ils aient été trempés, recuits ou transformés à froid. Tous les échantillons transformés accusent les propriétés mécaniques caractéristiques des aciers dont le point de transformation irréversible au refroidissement est situé au-dessus de la température ordinaire.

On remarquera que les échantillons (50), (53) et (54), déjà notablement transformés à la température ordinaire, accusent, après refroidissement, une augmentation de dureté considérable; le magnétisme est en même temps devenu plus intense; la transformation allotropique a pris plus d'intensité.

D'autre part, les échantillons (47) et (51), qui ne sont

Digitized by Google

TABLEAU XII.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS en nickel	TRAITEMENTS subis par les échantillons avant le refroidissement	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION — Echantillons non refroidis à — 78°				Échantillons refroidis à — 78°			
			Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements à la rupture p. 100	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$	Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements à la rupture p. 100	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
			kil.	kil.			kil.	kil.		
(47)	23.40	non trempé....	47.1	77.0	42.0	74	49.1	77.2	39.4	71
		trempé.....	31.8	67.0	52.7	76	53.4	76.4	16	24
(50)	24.04	non trempé....	46.4	111.0	20	24.1	120.9	141	5.7	13
		trempé.....	53.5	101.5	26	47	121.2	141.5	13.5	36.5
(51)	24.05	non trempé....	48.3	74.2	37	68	45.3	74.8	38.3	70
		trempé.....	31.3	63.9	51.7	74.5	77.4	110.8	13.3	29
(52)	24.06	non trempé....	49.3	97.2	24.3	48	122.5	139.1	15.0	42
		trempé.....	44.7	102.1	28.3	50	115.9	133	15.7	41
		recuit à 800°..	47.1	100.8	25	47	115.0	134.5	6.7	8
(53)	24.20	non trempé....	80.7	118.6	23.3	48	126.2	142.5	9.0	38.8
		trempé.....	65.2	110.0	24.3	48	110.0	137.5	13.3	40.6
(54)	24.40	non trempé....	66.5	108.2	22.3	51	82.7	137.9	8.3	25
		trempé.....	61.0	123.5	18.4	45	105.2	134.5	10.3	36
(67)	27.72	étiré à froid...	92.1	92.1	11.7	63.5	116.9	120.6	13.3	55.5

Digitized by Google

pas transformés par le refroidissement à — 78°, lorsqu'ils n'ont pas été trempés, sont transformés lorsqu'ils ont été trempés avant d'être refroidis. La trempe a produit un relèvement du point de transformation au refroidissement qui permet à la température de — 78° de produire la transformation. Cette constatation a été le point de départ de recherches dont nous rendrons compte bientôt.

Nous nous bornerons, pour le moment, à faire observer qu'après la trempe il suffit d'abaisser la température quelque peu au-dessous du point de transformation pour qu'il se produise aussitôt une transformation intense, relevant les limites d'élasticité et les résistances à la rupture de plus de 20 kilogrammes par millimètre carré pour l'échantillon (47) et de plus de 40 kilogrammes par millimètre carré pour l'échantillon (51).

La transformation se produit à température plus élevée et plus rapidement que lorsque l'acier n'a pas été soumis à la trempe, mais seulement pour les aciers dont le point de transformation est très éloigné au-dessous de la température ordinaire. Les échantillons (52) et (53), qui ont déjà commencé à se transformer à la température ordinaire, ne subissent pas une transformation plus intense après trempe qu'avant trempe. La trempe n'a donc une influence considérable que sur les aciers dont le point de transformation a une situation semblable à celle des échantillons (47) et (51).

Effets du refroidissement par l'air liquide. — Grâce au bienveillant concours que M. d'Arsonval a bien voulu nous donner en mettant à notre disposition de l'air liquide, nous avons pu constater les effets produits par un refroidissement plus intense que celui qui est obtenu avec la neige carbonique. Nous avons soumis à cette réfrigération des aciers ayant des points de transformation situés à des distances variées de la température ordinaire, afin de mettre en évidence l'influence de ce traitement à

Digitized by Google

petite ou grande distance du point de transformation.

Des éprouvettes provenant de la même barre ont été soumises à l'essai à la traction : 1° avant refroidissement; 2° après refroidissement dans la neige carbonique; 3° après refroidissement dans l'air liquide. Les résultats obtenus sont les suivants :

TABLEAU XIII.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS en nickel	POSITIONS des points de transformation	TRAITEMENTS SUBIS par les échantillons	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
				Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements à la rupture par mm. carré	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
				kil.	kil.		
(14 *bis*)	11.36	350° (*)	non refroidi	140	143	13.3	53.8
			refroidi à — 78°	115	147	13.3	53.8
			refroidi à — 188°	138.2	139.5	13.3	54.4
(17 *bis*)	14	280° (*)	non refroidi	112	115	10	34
			refroidi à — 78°	108	113.4	10	34
			refroidi à — 188°	111.4	116	10	35
(36)	20.52	80°	non refroidi	98.8	139.5	10	37
			refroidi à — 78°	141.0	146	9	37
			refroidi à — 188°	125.5	141	8	36
(52)	24.06	70° (*)	non trempé. non refroidi	66.5	108.2	22.3	51
			non trempé. refroidi à — 78°	82.7	137.9	8.3	25
			non trempé. refroidi à — 188°	115	128.5	13.3	53
			trempé. non refroidi	61	123.5	18.4	45
			trempé. refroidi à — 78°	105.2	134.5	10.3	36
			trempé. refroidi à — 188°	110.5	126.2	13.3	42

(*) Position du point de transformation évaluée d'après la composition chimique.

Le refroidissement au-dessous de la température ordinaire est à peu près sans action sur les propriétés mécaniques de l'acier à 11,36 p. 100 de nickel, ce qui est dû, sans doute, à la grande distance à laquelle est son point de transformation au-dessus de la température ordinaire, et aussi probablement à sa teneur en nickel relativement faible. Il en est de même pour l'échantillon (17 *bis*) à 14 p. 100 de nickel.

L'échantillon (36) à 20,52 p. 100 de nickel s'est transformé beaucoup plus complètement dans la neige carbo-

Digitized by Google

nique ; la limite d'élasticité s'est relevée, la résistance à la rupture a augmenté, et l'allongement à la rupture a diminué ; mais l'air liquide, loin d'augmenter l'intensité de la transformation, la diminue plutôt.

Il en est de même pour l'échantillon (52) à 24,06 p. 100 de nickel ; la transformation est beaucoup plus intense après le refroidissement à —78° ; mais elle diminue de nouveau quelque peu après refroidissement à — 188°. On remarquera que, après refroidissement à —188°, l'effet de la trempe sur la transformation de cet acier est complètement annulé.

Il résulte de ces constatations que les aciers au nickel à haute limite d'élasticité sont transformés aussi complètement que possible à la température ordinaire, lorsque leur point de transformation au refroidissement est situé à plus de 200 degrés au-dessus de cette température ; tandis que les aciers qui ont subi la transformation, dont le point de transformation n'est pas éloigné de la température ordinaire de plus de 100 degrés, subissent une transformation considérable au refroidissement à —78°, mais qui n'est pas augmentée, et est même diminuée, par le refroidissement à — 188°. On peut en conclure que, même à ces teneurs en nickel relativement élevées, le phénomène de l'irréversibilité atteint son maximum d'intensité par un refroidissement d'environ 200 dégrés au-dessous du point de transformation. Nous arriverons ultérieurement à la même conclusion par une autre voie.

Effets du relèvement de la température. — Les tableaux III et IV contiennent des résultats d'essais à la traction obtenus avec des échantillons recuits à 900° et 400°. Comparés avec ceux du tableau II, obtenus avec les mêmes échantillons non recuits, ils montrent que ces deux recuits produisent des effets différents suivant la teneur des aciers au nickel traités.

Digitized by Google

L'effet produit dépend de la position du *point de transformation à l'échauffement*. Lorsque l'acier est porté à une température supérieure à celle de ce point de transformation, il passe à l'état non magnétique ; mais, lorsqu'il est porté à une température élevée, sans dépasser cependant ce point de transformation, il reste à l'état magnétique. Les résultats d'essais à la traction rappelés ci-dessus démontrent que, dans le premier cas, la dureté de l'acier augmente, tandis que, dans le second cas, elle s'atténue considérablement. Imphy a constaté, en 1895, cette propriété comme appartenant à un acier à 12,5 p. 100 de nickel ; on voit qu'elle appartient à tous les aciers qui ont subi la transformation irréversible.

M. Osmond a étudié ce phénomène de l'atténuation de la transformation sur deux échantillons d'aciers au nickel, à 15,48 et 19,64 p. 100, en suivant les variations du magnétisme rémanent (*), après des recuits à des températures croissantes. Ses expériences sont résumées dans un diagramme que nous reproduisons (*fig.* 9) ; il met très clairement en évidence l'influence de la position du point de transformation à l'échauffement ; immédiatement au-dessous de ce point de transformation, l'atténuation du magnétisme rémanent atteint son maximum, comme l'atténuation de la dureté.

Ces constatations établissent une grande analogie entre les aciers au nickel ayant subi la transformation réversible et les aciers au carbone trempés, car, de part et d'autre, le recuit au-dessous du point de transformation, ou revenu, adoucit considérablement le métal sans détruire complètement la dureté.

L'analogie est moindre pour les effets de la trempe et

(*) *Experiments on alloys of iron and nickel* (*Excerpt Minutes of Proceedings of The Institution of Civil Engineers*, p. 18). Voir aussi : *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* (*Sur les aciers à aimants*), t. CXXVIII, p. 1513, juin 1899.

Digitized by Google

du recuit au-dessus du point de transformation, mais elle est plus grande qu'il ne paraît au premier abord. En effet, le nickel reste toujours uniformément réparti dans l'acier, quel que soit le traitement qu'il a subi ; c'est pourquoi l'artifice de la trempe, refroidissement brusque, est inutile, tandis qu'il est nécessaire pour maintenir unifor-

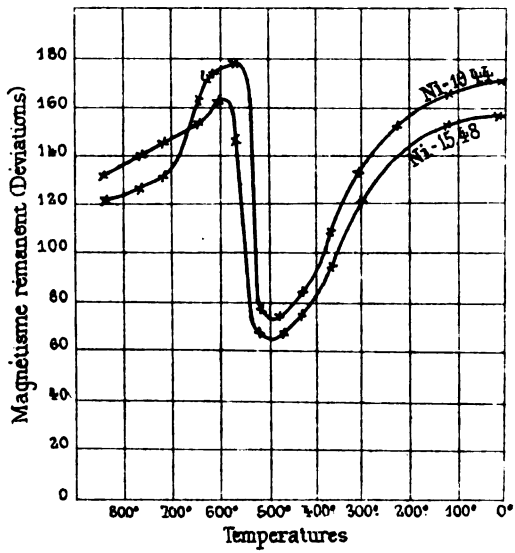


Fig. 9. — Expériences de M. Osmond.

mément réparti le carbone, qui a tendance à se concentrer sur certains points, lorsque la température s'abaisse lentement. Pour l'acier au nickel, l'élévation de la température est presque suffisante pour produire le durcissement dont le métal est susceptible, par conséquent la trempe fatigue assez inutilement le métal. Pour l'acier au carbone, un refroidissement brusque après le chauffage est indispensable à cause de cette propriété particulière du carbone, qui paraît être la seule différence

Digitized by Google

vraiment fondamentale entre les natures de ces deux sortes d'aciers.

La trempe durcit cependant très nettement sans les rendre secs les aciers au nickel dont le point de transformation est peu éloigné au-dessus de la température ordinaire. Cet effet particulier s'explique par l'action de la trempe sur la partie de l'acier qui n'est pas encore transformée. Nous avons déjà constaté que la trempe facilite beaucoup la transformation en relevant le point de transformation au refroidissement. La transformation n'est toujours produite que par l'abaissement de la température ; mais ce relèvement est parfois assez grand pour que la température ordinaire puisse agir. Nous reviendrons bientôt sur cette intéressante question.

Variations de l'état allotropique des aciers au nickel résultant des variations de la teneur en nickel. — Le point de transformation irréversible s'abaissant à mesure que la teneur en nickel augmente, il en résulte que l'augmentation de la teneur en nickel équivaut, dans une certaine mesure, à un relèvement de la température.

Les aciers au nickel, en revenant à la température ordinaire, peuvent soit ne pas subir la transformation, soit la subir plus ou moins complète, suivant que leur point de transformation au refroidissement est au-dessous de la température ordinaire ou au-dessus, et plus ou moins éloigné. Par conséquent, l'état allotropique des aciers à teneurs en nickel croissantes correspond successivement à la période de transformation irréversible complète, puis à celle de transformation incomplète, et enfin à celle où il ne s'est pas produit de transformation.

Nous signalerons, à l'appui de ces considérations, que les résultats des essais à la traction sont à peu près les mêmes pour l'acier à 25 p. 100 de nickel refroidi à — 78° et pour l'acier à 21 p. 100 de nickel non refroidi ; l'inter-

Digitized by Google

valle de température d'environ 90 degrés équivaut à 4 p. 100 de nickel. Cependant cette comparaison ne doit pas être poursuivie plus bas que 15 p. 100 de nickel, teneur au-dessous de laquelle l'irréversibilité devient rapidement très faible.

MODIFICATIONS DE L'ÉTAT ALLOTROPIQUE SOUS L'INFLUENCE DE LA TREMPE, DE L'ÉCROUISSAGE ET DU RECUIT.

Position des points de transformation allotropique. — Nous avons eu l'occasion de signaler deux échantillons d'acier au nickel, les échantillons (47) et (51), à 23,40 et 24,05 p. 100 de nickel, qui ne se transforment pas dans la neige carbonique, lorsqu'ils n'ont subi aucun traitement particulier après le forgeage ou le laminage, mais se transforment nettement dans ce bain réfrigérant lorsqu'ils ont été, au préalable, trempés dans l'eau froide après chauffage au rouge cerise clair. La trempe a relevé le point de transformation, puisqu'elle l'a fait passer d'une température inférieure à — 78° à une température supérieure.

Cette constatation a été le point de départ de recherches particulières ; elles ont établi que ce relèvement est la règle générale pour les aciers de la catégorie dont font partie les aciers (47) et (51). Par conséquent, le diagramme des positions des points de transformation, qui a été dressé par M. Osmond, diagramme que nous avons reproduit (*fig.* 4), et celui qui réunit à ceux de M. Osmond les résultats de nos propres recherches (*fig.* 7), ne donneraient pas des indications exactes si on les utilisait pour des aciers au nickel ayant subi la trempe.

Il a aussi été constaté que ces mêmes échantillons, lorsqu'ils sont écrouis, soit par un étirage à la filière, soit par un forgeage à froid, deviennent magnétiques à la température ordinaire (*), tandis qu'ils sont magné-

(*) Le fait que l'écrouissage ramène le magnétisme dans certains aciers non magnétiques a été signalé par M. André Le Chatellier.

Digitized by Google

tiques à — 78° lorsqu'ils n'ont pas subi ce traitement. L'écrouissage a donc relevé le point de transformation d'une température inférieure à — 78° à une température supérieure à + 15°. Le relèvement produit par l'écrouissage est encore plus grand que celui qui est produit par la trempe. Les diagrammes rappelés ci-dessus ne sont pas davantage applicables aux aciers au nickel ayant subi un écrouissage.

Il a encore été constaté que, dans certains cas, le recuit seul produit le même résultat, à savoir un relèvement des points de transformation.

Il convient donc de ne pas oublier que les diagrammes précédemment établis ne donnent les positions des points de transformation des aciers au nickel que pour des aciers qui n'ont été ni trempés, ni écrouis, ni recuits.

Nous avons entrepris de déterminer les positions des points de transformation des aciers au nickel proprement dits, trempés ou écrouis, ou trempés d'abord et écrouis ensuite, ou trempés, écrouis et recuits, ou seulement recuits. Il a été reconnu que la trempe et l'écrouissage produisent sensiblement le même résultat au point de vue de la position du point de transformation ; l'écrouissage agit plus que la trempe, et la combinaison de ces deux traitements agit plus encore que l'un d'eux isolément. L'action du recuit est semblable, mais ne s'ajoute pas toujours à celle de la trempe et de l'écrouissage.

Déterminations de points de transformation. — Les points de transformation de la série d'échantillons qui a déjà fait l'objet de nos expériences ont été déterminés à nouveau : 1° après trempe ; 2° après écrouissage ; 3° après trempe et écrouissage. Nous avons reproduit, pour rendre la comparaison plus facile, les déterminations déjà données, obtenues avec les mêmes échantillons avant trempe et écrouissage.

Digitized by Google

TABLEAU XIV.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN			TRAITEMENTS subis par les échantillons	POSITIONS DES POINTS DE TRANSFORMATION			
					irréversible		réversible	
	Carbone	Manganèse	Nickel		à l'échauffement	au refroidissement	à l'échauffement	au refroidissement
(1)	0.166	0.026	0	ni trempe ni écrouissage	820°	810°	»	»
				trempe et écrouissage	810° (*)	800° (*)	»	»
(6)	0.113	0.102	5.56	ni trempe ni écrouissage	740°	620°	»	»
				trempe	730°	610°	»	»
				écrouissage	735°	615°	»	»
				trempe et écrouissage	720°	610°	»	»
(10)	0.107	0.256	9.92	ni trempe ni écrouissage	680°	440°	»	»
				trempe	670°	425°	»	»
				écrouissage	665°	440°	»	»
				trempe et écrouissage	650°	425°	»	»
(20)	0.170	0.819	14.52	ni trempe ni écrouissage	620°	145°	»	»
				trempe et écrouissage	600°	140°	»	»
(36)	0.158	0.435	20.52	ni trempe ni écrouissage	580°	80°	»	»
				trempe	585°	90°	»	»
				écrouissage	585°	100°	»	»
				trempe et écrouissage	585°	100°	»	»
(42)	0.095	0.230	22.64	ni trempe ni écrouissage	560°	150°	»	»
				trempe	580°	300°	»	»
				écrouissage	580°	350°	»	»
				trempe et écrouissage	585°	430°	»	»
(50)	0.343	0.506	24.04	ni trempe ni écrouissage	550°	60°	»	»
				trempe	565°	330°	»	»
				écrouissage	560°	360°	»	»
				trempe et écrouissage	570°	440°	»	»
(58)	0.098	0.153	24.72	ni trempe ni écrouissage	585°	75°	»	»
				trempe	612°	120°	»	»
				écrouissage	575°	190°	»	»
				trempe et écrouissage	625°	185°	»	»
(63)	0.079	0.230	25.84	ni trempe ni écrouissage	540°	25°	60°	50°
				trempe	550°	410°	»	»
				écrouissage	560°	450°	»	»
				trempe et écrouissage	560°	500°	»	»

Digitized by Google

(65)	0.233	0.182	27.12	ni trempe ni écrouissage et refroidissement à — 78°	475°	vers — 10°	95°	90°
				trempe	480°	390°	»	»
				écrouissage	475°	380°	»	»
				trempe et écrouissage	485°	460°	»	»
(67)	0.251	0.364	27.72	ni trempe ni écrouissage et refroidissement à — 78°	425°	vers — 70°	95°	90°
				trempe	465°	380°	»	»
				écrouissage	480°	420°	»	»
				trempe et écrouissage	475°	430°	»	»
(71)	0.110	0.650	28.82	ni trempe ni écrouissage et refroidissement à — 78°	410°	vers — 75°	100°	90°
				trempe et refroidissement à — 78°	450°	350°	»	»
				écrouissage	460°	390°	»	»
				trempe et écrouissage	465°	420°	»	»
(73)	0.322	0.409	29.76	ni trempe ni écrouissage et refroidissement à — 188°	»	»	110°	100°
				trempe et écrouissage et refroidissement à — 78°	»	»	110°	100°
				trempe et écrouissage et refroidissement à — 188°	480°	vers — 150°	»	110°
(76)	0.093	0.315	30.44	ni trempe ni écrouissage et refroidissement à — 188°	375°	vers — 100°	90°	90°
				trempe et écrouissage et refroidissement à — 78°	435°	vers — 70°	»	»
				trempe et écrouissage et refroidissement à — 188°	400°	vers — 100°		»
(77)	0.155	0.358	31.04	ni trempe ni écrouissage et refroidissement à — 188°	»	»	110°	110°
				trempe et écrouissage et refroidissement à — 188°	425°	vers — 150°	»	»
(81)	0.215	0.563	36.88	ni trempe ni écrouissage	»	»	265°	265°
				trempe	»	»	260°	260°
				écrouissage	»	»	260°	260°
				trempe et écrouissage	»	»	255°	255°
(83)	0.367	0.947	43.60	ni trempe ni écrouissage	»	»	375°	365°
				trempe	»	»	370°	365°
				écrouissage	»	»	365°	360°
				trempe et écrouissage	»	»	355°	345°

(*) La disparition du magnétisme à l'échauffement a mis l'aiguille aimantée en mouvement à 630° ; son mouvement s'est achevé à 810°. Au refroidissement, après échauffement à 850°, le mouvement de l'aiguille a commencé à 860° très lent et s'est achevé à 600°.

Digitized by Google

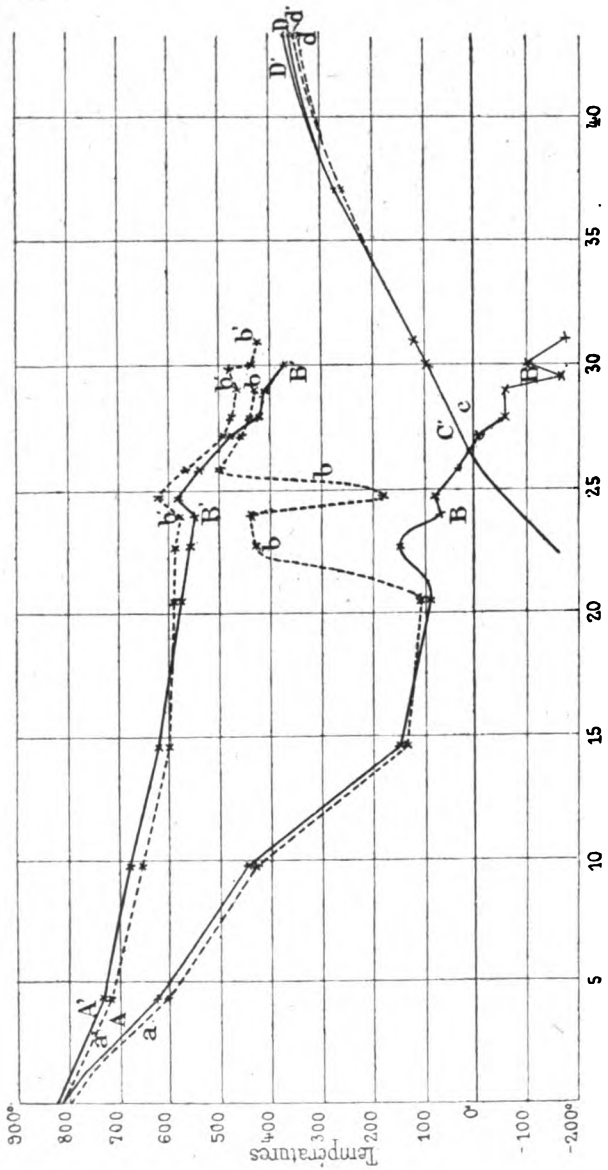


FIG. 10. — Positions des points de transformation des aciers au nickel à teneurs comprises entre 0 et 45 p. 100 avant et après trempe et écrouissage.

ABB, Courbe des points de transformation irréversible au refroidissement avant trempe et écrouissage.

abb,	id.	id.	après	id.
A'B'B',	id.	id.	à l'échauffement avant	id.
a'b'b',	id.	id.	après	id.
CD,	id.	réversible au refroidissement avant		id.
cd,	id.	id.	après	id.
CD',	id.	id.	à l'échauffement avant	id.
cd',	id.	id.	après	id.

Les résultats des déterminations sont inscrits au tableau XIV.

Examen des résultats obtenus. — Ces résultats sont résumés dans le diagramme (*fig.* 10), qui donne comparativement : 1° en traits pleins, les courbes des points de transformation des aciers au nickel proprement dits, non trempés et non écrouis ; et 2° en traits interrompus les mêmes courbes pour les mêmes aciers soumis d'abord à la trempe, puis à l'écrouissage.

On voit immédiatement que l'effet produit sur les positions des points de transformation irréversible est d'abord un abaissement qui reste peu considérable, puis un relèvement qui devient de plus en plus important.

L'examen des résultats obtenus permet de former, dans la série d'échantillons qui a fait l'objet de nos expériences, plusieurs groupes distincts au point de vue de l'effet produit par la trempe et l'écrouissage sur la position des points de transformation.

Un premier groupe est formé par les échantillons (1) à (20), c'est-à-dire pour les aciers au nickel dont la teneur en nickel est comprise entre 0 et 14,52 p. 100. Ces aciers sont peu sensibles à l'influence de la trempe et de l'écrouissage, au point de vue des positions mêmes des points de transformation. Le fer pur, échantillon (1), les échantillons (6) à 5,56 et (10) à 9,92 p. 100 de nickel accusent des abaissements des points de transformation à l'échauffement et au refroidissement qui ne dépassent pas un petit nombre de degrés, et l'échantillon (20), 14,52 p. 100 de nickel, n'accuse qu'un abaissement très faible.

Un deuxième groupe est formé par les échantillons (36) à (63). L'effet produit par la trempe et l'écrouissage est un relèvement des points de transformation. L'échantillon (36) à 20,52 p. 100 de nickel n'accuse encore qu'un très léger relèvement; mais, à partir de la teneur en nickel

Digitized by Google

de 22,64 p. 100, échantillon (42), l'influence de la trempe et de l'écrouissage sur la position des points de transformation devient considérable.

Les échantillons (42) à (63), 22,64 à 25,84 p. 100 de nickel, se font remarquer par une particularité très intéressante : Lorsqu'on procède à la détermination du point de transformation au refroidissement, on voit l'aiguille aimantée se mettre en mouvement, et accuser ainsi la position de ce point de transformation à une température supérieure de plusieurs centaines de degrés, de 200 à 400 degrés, à celle du point de transformation de l'échantillon non écroui ni trempé. Mais, loin de s'orienter immédiatement à angle droit avec la direction du champ terrestre, l'aiguille effectue son mouvement si lentement qu'elle ne prend cette orientation qu'après un abaissement de la température qui atteint et dépasse même 300 degrés.

Le point de transformation à l'échauffement est, en outre, notablement relevé.

Ce groupe accuse donc des relèvements des points de transformation à l'échauffement et au refroidissement, très considérables au refroidissement. En outre, la transformation devient très lentement progressive dans la zone de plusieurs centaines de degrés de l'échelle des températures sur laquelle s'est produit le relèvement.

Les échantillons du troisième groupe [(65) à (71), 27,12 à 28,82 p. 100 de nickel] se comportent autrement. La zone de transformation progressive très lente que nous venons de signaler a beaucoup diminué d'étendue, au point d'avoir presque disparu, et le point de transformation au refroidissement est très fortement relevé, surtout après trempe et écrouissage. Le point de transformation à l'échauffement est aussi relevé, mais quelque peu seulement, comme dans le groupe d'échantillons précédent.

On remarquera que, avant d'avoir été trempés et écrouis, ces trois échantillons ne subissaient la transfor-

Digitized by Google

mation irréversible qu'en étant immergés dans la neige carbonique. Après avoir été trempés et écrouis, ils subissent cette transformation à la température ordinaire. Cependant l'échantillon (71) à 28,82 p. 100 de nickel est à la limite, car il n'est pas transformé à la température ordinaire, lorsqu'il a été seulement trempé sans être écroui ; dans ce cas, on n'obtient la transformation qu'en refroidissant par la neige carbonique. Mais l'écrouissage suffit, sans l'intervention de la neige carbonique, pour relever le point de transformation jusqu'à la température ordinaire, c'est-à-dire pour permettre à cette température de produire la transformation. Il en est de même pour la trempe et l'écrouissage combinés. On remarquera que cet échantillon est notablement manganésé ; d'où un abaissement du point de transformation encore plus grand que celui qui correspond à la teneur en nickel de 28,82 p. 100.

Les échantillons (73), (76) et (77) forment un quatrième groupe, dont le point de transformation est assez abaissé pour qu'il soit nécessaire de recourir à l'air liquide, et même (73) et (77) sont trop carburés et manganésés pour pouvoir être transformés sans avoir subi la trempe et l'écrouissage ; (76), qui est très peu carburé, a pu être transformé par une immersion dans un bain de neige carbonique, mais seulement après avoir été trempé six fois au rouge cerise clair et avoir été écroui par forgeage à froid très intense. Ces traitements énergiques ont relevé le point de transformation au refroidissement au-dessus de —78°, après quoi le point de transformation à l'échauffement a pu être constaté à +435°, soit à 80 degrés au dessus du point de transformation correspondant du même acier non trempé et non écroui, refroidi dans l'air liquide.

Un second échantillon de ce même acier a été immergé dans l'air liquide après avoir été trempé et écroui moins fortement. Cet échantillon et les échantillons (73) et (77)

Digitized by Google

ont été transformés, et les points de transformation à l'échauffement ont été constatés à 480°, 400° et 425°; mais, au refroidissement, le magnétisme n'a reparu que par la transformation réversible. Nous signalerons que la position des points de transformation réversible de ces aciers est parfois notablement modifiée et qu'elle est souvent variable pendant quelque temps, à la suite de l'ébranlement moléculaire produit par la transformation irréversible à très basse température; nous ne décrivons pas le phénomène dans toute sa complexité.

Les échantillons (81) et (83) à 36,88 et 43,60 p. 100 de nickel forment un cinquième groupe qui ne subit pas la transformation irréversible dans l'air liquide, même après une trempe et un écrouissage énergiques. Le point de transformation irréversible au refroidissement paraît être situé trop bas pour pouvoir être atteint au moyen de l'air liquide. Quant aux points de transformation réversible, ils semblent très légèrement abaissés; l'action de la trempe et de l'écrouissage sur ces points de transformation est presque négligeable et n'est nullement comparable à celle que ces traitements ont sur les points de transformation irréversible. C'est une nouvelle distinction à faire entre ces deux sortes de transformation; il est intéressant de la signaler.

En résumé, à mesure que la teneur en nickel augmente, la trempe et l'écrouissage produisent successivement les effets suivants :

1° Fer pur. — *Abaissement peu important* des points de transformation. — L'action de l'écrouissage n'en a pas moins été considérable, car l'aiguille aimantée revient à la position à angle droit avec le champ terrestre beaucoup plus lentement qu'avant la trempe et l'écrouissage; la transformation est devenue beaucoup plus progressive;

2° Teneurs en nickel comprises entre 0 et 15 p. 100 :

Digitized by Google

abaissement peu important des deux points de transformation, comme pour le fer pur;

3° Teneurs en nickel comprises entre 15 et 21 p. 100 : *abaissement et relèvement presque nuls* des deux points de transformation ;

4° Teneurs en nickel comprises entre 21 et 27 p. 100 : *relèvement notable* du point de transformation à l'échauffement, et *relèvement très considérable* du point de transformation au refroidissement, mais avec échelonnement de la reprise du magnétisme sur une zone de température très étendue ;

5° Teneurs en nickel comprises entre 27 et 29 p. 100 : *relèvement notable* du point de transformation à l'échauffement, et *relèvement très considérable* du point de transformation au refroidissement, sans échelonnement de la reprise du magnétisme, sur une zone de température très étendue; la transformation s'effectue rapidement;

6° Teneurs en nickel comprises entre 29 et 31 p. 100 : *relèvement notable* du point de transformation à l'échauffement, d'autant plus grand que l'écrouissage a été plus intense ; le point de transformation au refroidissement ne peut pas être constaté;

7° Teneurs en nickel supérieures à 31 p. 100 : la transformation irréversible ne peut plus être produite, même en refroidissant à —188° au moyen de l'air liquide. Les points de transformation réversible sont légèrement abaissés.

Ces divers relèvements de points de transformation ne résultent pas précisément de l'action de la trempe et de l'écrouissage, mais plutôt de l'abaissement de la température qui suit ces traitements, abaissement qui quelquefois n'est que le retour à la température ordinaire.

Effets du recuit sur les positions des points de transformation après trempe et écrouissage. — Les positions des

Digitized by Google

points de transformation, résultant des effets de la trempe et de l'écrouissage, ne sont pas modifiées immédiatement par un échauffement peu prolongé ; mais des échauffements suivis de refroidissements, répétés à plusieurs reprises, les rendent de moins en moins perceptibles, et la température de 800° maintenue pendant une demi-heure les fait disparaître complètement.

Il faut en conclure que si, pour les aciers à teneurs en nickel de 21 p. 100 et plus, la trempe et l'écrouissage tendent à relever considérablement le point de transformation au refroidissement, et à l'amener à faible distance du point de transformation à l'échauffement, une température élevée, maintenue pendant un temps suffisant, tend à rétablir l'écart primitif entre ces deux points.

C'est ce qui résulte de l'expérience suivante : un échantillon d'acier (65) à 27,12 p. 100 de nickel, trempé et écroui, a été introduit dans le four chauffé électriquement et maintenu à la température de 800° pendant dix minutes. Le magnétisme avait disparu à l'échauffement à 480° ; il a reparu au refroidissement à 460°. L'échantillon a été ramené une seconde fois à la température de 800°, qui a été de nouveau maintenue pendant dix minutes ; après quoi le magnétisme a reparu au refroidissement à 450°. L'échantillon a été porté une troisième fois à la température de 800°, qui a été maintenue quinze minutes ; au refroidissement qui a suivi, le point de transformation irréversible n'a plus reparu ; la transformation réversible a seule été constatée vers 80°.

Cette expérience semble démontrer que les effets de la trempe et de l'écrouissage sont complètement détruits par un recuit à 800° suffisamment prolongé. Il n'en est cependant pas ainsi ; l'échantillon qui a subi ce traitement n'a pas été ramené exactement au même état qu'avant d'avoir subi la trempe et l'écrouissage ; en effet, soumis au refroidissement à — 78°, il a accusé des points de

Digitized by Google

transformation irréversible à l'échauffement à 480° et au refroidissement à 415°. Or un échantillon de ce même acier non trempé et non écroui, refroidi à — 78°, accuse des points de transformation irréversible à l'échauffement à 490°, et, au refroidissement au-dessous de 90° environ, point de transformation réversible. On voit que la trempe et l'écrouissage suivis d'un recuit ont profondément modifié l'état moléculaire de cet acier.

Influence du recuit sur la position des points de transformation. — Cette constatation conduit à rechercher quel est l'effet du recuit sur un échantillon n'ayant subi aucun traitement après le laminage à chaud. Un échantillon du même acier (65), non trempé et non écroui, a été maintenu pendant vingt-cinq minutes à la température de 800° dans le tube du four chauffé électriquement; au refroidissement qui a suivi, il n'a pas accusé la transformation irréversible avant de subir la transformation réversible vers 100°.

Le recuit semble n'avoir produit aucun effet notable; il n'en est pas ainsi, car, cet échantillon ayant ensuite été refroidi à — 78°, la transformation irréversible s'est manifestée par un point de transformation à l'échauffement à 480° et un point de transformation au refroidissement à 420°. Le recuit seul a produit un effet presque identique à celui de la trempe et de l'écrouissage; comme ces deux traitements, il ne produit un relèvement des points de transformation que lorsqu'il est suivi d'un abaissement de la température.

Il semble que cet abaissement nécessaire de la température soit plus grand pour le recuit que pour la trempe, et plus grand pour la trempe que pour l'écrouissage.

Le retour à la température ordinaire constitue un abaissement de la température suffisant pour produire la transformation, lorsque le point de transformation au refroidis-

Digitized by Google

sement de l'acier est situé au-dessus de la température ordinaire pour l'acier n'ayant subi aucun traitement après le laminage. C'est le cas de l'acier (50) à 24,04 p. 100 de nickel, dont les points de transformation irréversible sont situés à 545° et 60°. Un échantillon de cet acier, introduit au four chauffé électriquement, a été maintenu à la température de 800° pendant quarante minutes, puis ramené à la température ordinaire. Un second chauffage a accusé le point de transformation à l'échauffement à 565° et le point de transformation au refroidissement à 550°. Le recuit a suffi pour produire ce relèvement, parce qu'il a été suivi d'un abaissement de la température suffisant.

Il est donc démontré que, au point de vue de la position des points de transformation, l'état moléculaire produit par le recuit n'est pas le même que celui qui existe au sortir du laminage à chaud.

Ces constatations viennent s'ajouter à celles qui nous permettent de considérer comme peu différents les effets produits par la trempe et le recuit sur les aciers au nickel, effets qui témoignent d'une importante modification d'état moléculaire.

On a remarqué que le groupe des aciers à 30 et 31 p. 100 de nickel, dont le point de transformation est situé vers — 200°, accuse, lorsque la transformation irréversible a été produite, un point de transformation à l'échauffement très fortement relevé, mais n'accuse pas, comme les aciers à teneurs en nickel un peu moindres, un point de transformation au refroidissement. Il paraît résulter de ce qui vient d'être exposé que le relèvement de la température à une distance de plus de 600 degrés au-dessus du point de transformation au refroidissement agit comme un recuit, et atténue l'effet produit par la trempe et l'écrouissage assez pour rendre impossible la constatation de ce point de transformation au refroidissement. L'effet produit par la trempe et l'écrouissage n'est cependant pas

Digitized by Google

complètement annulé, car un nouveau refroidissement à — 78° opère de nouveau la transformation de l'échantillon à 30,44 p. 100 très fortement trempé et écroui, transformation caractérisée par la disparition du magnétisme à + 435°, c'est-à-dire à la même température que précédemment.

Hystérèse. — Ces constatations démontrent que l'irréversibilité est un phénomène de *retard* ou d'*hystérèse*, semblable à la surfusion, la sursaturation, etc. L'hystérèse est un frottement moléculaire qui maintient, lorsque la température s'abaisse, un état d'équilibre instable ; elle est mesurée par l'écart qui s'établit entre les points de transformation à l'échauffement et au refroidissement. Le recuit, la trempe et l'écrouissage détruisent ou atténuent beaucoup ce frottement moléculaire, et tendent à produire, lorsque la température s'abaisse, un nouvel équilibre, caractérisé par un écart beaucoup moindre entre les points de transformation à l'échauffement et au refroidissement, et par une transformation allotropique plus rapide.

Nous ferons observer que l'atténuation ou la destruction de l'hystérèse rapprochent les deux points de transformation presque exclusivement par relèvement du point de transformation au refroidissement. C'est donc le point de transformation à l'échauffement qui est le moins éloigné de sa position normale, conformément à la règle générale des phénomènes de retard au refroidissement.

Il en résulte que la rapidité avec laquelle se fait l'abaissement du point de transformation des aciers au nickel, lorsque la teneur en nickel augmente, a pour cause principale le phénomène de l'hystérèse, qui se manifeste par un écart très considérable entre les points de transformation à l'échauffement et au refroidissement. Nous avons déjà eu l'occasion de faire remarquer que les

Digitized by Google

courbes des points de transformation à l'échauffement des aciers au nickel, ou leurs prolongements, se coupent, sur le diagramme, vers 38 p. 100 de nickel à une température d'environ 280°. On voit que, sans l'intervention du phénomène de l'hystérèse, il n'existerait pas d'aciers au nickel non magnétiques à basse température.

L'hystérèse pouvant être fortement atténuée et presque complètement détruite à l'aide du recuit, de la trempe ou de l'écrouissage, il est possible de produire la transformation irréversible dans les aciers à teneurs en nickel très élevées, en combinant ces traitements avec des refroidissements à très basse température. C'est ainsi que nous avons réussi à transformer un acier à 31,04 p. 100 de nickel notablement carburé et manganésé. Cette constatation vient à l'appui de notre hypothèse du prolongement des courbes des diagrammes de la *fig.* 7.

Le recuit, la trempe et l'écrouissage peuvent non seulement relever le point de transformation au refroidissement, mais encore l'amener au-dessus de la position qu'occupait le point de transformation à l'échauffement avant que l'acier ait subi ces traitements ; le point de transformation à l'échauffement est lui-même notablement relevé; on voit que, aux teneurs supérienres à 21 p. 100 de nickel, il se produit sous l'influence de ces traitements, outre la suppression du retard, un relèvement des deux points de transformation.

Distinctions entre les aciers au nickel de diverses teneurs résultant des effets de la trempe et de l'écrouissage. — Nous avons déjà fait constater que les aciers au nickel se comportent très différemment au recuit et à la trempe, suivant qu'ils appartiennent à l'un ou l'autre des quatre groupes que nous avons constitués d'après les variations des propriétés mécaniques. Les aciers des deux premiers groupes sont en particulier peu sensibles à la trempe, qui agit da-

Digitized by Google

vantage sur ceux du troisième groupe, et très fortement sur ceux du quatrième groupe.

Nous avons aussi fait constater que les aciers qui ont subi complètement la transformation irréversible, premier et deuxième groupe, s'écrouissent peu, que ceux du troisième qui l'ont subie incomplètement s'écrouissent notablement, et que ceux du quatrième groupe, qui ne l'ont pas subie du tout, s'écrouissent considérablement.

La même distinction doit être faite au sujet de l'action de la trempe et de l'écrouissage sur la position des points de transformation. Les aciers du premier et du deuxième groupe trempent et s'écrouissent peu, c'est pourquoi leurs points de transformation s'éloignent peu de leurs positions primitives sous l'action de la trempe et de l'écrouissage. Les aciers du troisième groupe, qui ne subissent que faiblement l'action de la trempe et de l'écrouissage au point de vue mécanique, ne subissent aussi que faiblement leur action au point de vue du rapprochement des points de transformation, tandis que les aciers du quatrième groupe, qui trempent et s'écrouissent fortement, subissent fortement l'action de ces deux traitements, d'où le rapprochement considérable des deux points de transformation qui est constaté.

En résumé, l'hystérèse résiste à l'action de la trempe et de l'écrouissage, tant que l'augmentation de la teneur en nickel n'a pour effet que de produire de la dureté. Elle cesse de résister à leur action dès que l'augmentation de la teneur en nickel commence à atténuer la dureté, c'est-à-dire dès que la transformation irréversible cesse d'être complète. La concordance est ainsi parfaite entre les divers procédés qui mettent en évidence l'influence de la transformation allotropique irréversible, ou mieux de la *transformation allotropique à grande hystérèse*, sur les diverses propriétés physiques et mécaniques des aciers au nickel.

(*La suite à la prochaine livraison.*)

Digitized by Google

BULLETIN.

STATISTIQUE DE L'INDUSTRIE MINÉRALE DE L'ITALIE EN 1900.

NATURE DES PRODUITS	QUANTITÉS	VALEUR	PRIX moyen	NOMBRE d'ouvriers
1° *Production des mines.*				
	tonnes	francs	fr. c.	
Minerai de fer	247.278	4.585.522	18,54	2.173
— de manganèse	6.014	154.974	25,76	166
— ferro-manganésifère	26.800	335.000	12,50	270
— de cuivre	95.824	3.169.842	33,08	2.098
— de zinc	139.679	16.408.481	117,48	16.133
— de plomb	35.103	7.238.965	206,22	
— de plomb, zinc et cuivre	4.005	112.997	28,21	235
— d'argent	584	398.870	683,00	523
— d'or	5.840	266.284	45,60	539
— d'antimoine	7.607	362.342	47,63	394
— de mercure	33.930	1.127.380	33,22	797
Arsenic	6	480	80,00	4
Pyrite de fer et de cuivre	71.616	1.480.276	20,67	740
Combustibles minéraux	479.896	3.542.355	7,38	3.683
Minerai de soufre	3.628.613	41.701.381	11,49	34.344
Sel gemme	18.331	276.387	15,07	343
Sel de sources	10.890	366.519	33,65	
Pétrole brut	1.683	491.769	292,20	390
Gaz hydrocarburé	1.400.338m3	49.399	0,035	
Eaux minérales	27.707tons	367.202	13,25	
Asphalte	100.775	1.339.873	13,30	1.692
Bitume	963	121.560	126,23	
Alunite	5.200	36.400	7,00	95
Acide borique	2.491	847.144	340,08	380
Graphite	9.720	278.600	28,66	244
Totaux	»	85.060.002	»	65.243
2° *Production des usines minéralurgiques.*				
	tonnes	francs	fr. c.	
Fonte	23.990	3.129.170	130,43	1.029
Fonte de 2e fusion	18.581	4.420.783	237,92	
Fer	190.518	51.561.452	270,64	
Acier	115.887	34.325.767	296,20	14.714
Tôles étamées	10.000	6.000.000	600,00	
Cuivre	10.405	24.239.866	2.329,64	2.513
Zinc	547	328.795	601,09	30
Plomb	23.763	10.442.343	439,44	
Argent	31.168kg	3.360.497	107,82	629
Or	57kg	199.933	3.477,09	
Etain	15tons	20.900	1.393,33	16
Antimoine	1.174	771.800	657,41	95
Mercure	260	1.560.000	6.000,00	179
Agglomérés de charbon minéral	703.740	23.751.800	33,75	792
Agglomérés de charbon végétal	17.500	1.280.500	73,17	
Soufre brut	554.119	51.064.517	92,15	6.339
Soufre raffiné	157.957	17.322.042	109,66	493
Soufre en poudre	167.466	18.183.210	108,58	1.159
Sel marin	338.034	2.369.117	7,01	2.648
Asphalte et bitume	33.127	1.009.316	30,47	266
Pétrole, benzine, etc	11.973	2.961.254	247,32	168
Gaz d'éclairage — Gaz	193.980.279m3	37.132.707	0,191	
Gaz d'éclairage — Produits coke	487.831tons	18.026.515	36,95	
Gaz d'éclairage — Produits goudron	31.853	1.051.731	33,02	4.915
Gaz d'éclairage — Produits secondaires eaux ammoniacales	23.971	229.922	9,59	
Gaz d'éclairage — Produits secondaires sulfate d'ammoniaque	1.847	537.031	290,70	
Gaz d'éclairage — Ferrocyanure de calcium	324	55.152	170,22	
Totaux	»	315.336.120	»	35.985

(*Extrait de la* Rivista del Servizio minerario nel 1900.)

Digitized by Google

RECHERCHES

SUR LES

ACIERS AU NICKEL A HAUTES TENEURS

Par M. L. DUMAS, Ingénieur des Arts et Manufactures,
Ingénieur-Conseil, Ancien Chef du Service métallurgique de la Société de Commentry-Fourchambault et Decazeville.

(*Suite et fin*) (*).

DEUXIÈME PARTIE.

ACIERS AU NICKEL CARBURÉS, CHROMÉS ET MANGANÉSÉS.

Influence des teneurs en carbone, chrome et manganèse sur les propriétés mécaniques des aciers au nickel. — Des résultats particulièrement remarquables ont été obtenus à Imphy, aux essais mécaniques, avec un acier au nickel dénommé à l'origine NC-4, dont la composition chimique moyenne est la suivante :

Nickel.....	20 à 25 p. 100
Carbone.....	0,6 à 0,8 —
Manganèse....	environ 0,5 —
Chrome.....	2 à 3 —

Par ses propriétés mécaniques (*), cet acier rappelle les aciers au nickel proprement dits qui n'ont pas subi la transformation irréversible, quoiqu'il s'en éloigne notablement par sa limite d'élasticité plus élevée et sa résistance à la rupture beaucoup plus considérable, en même

(*) Voir *suprà*, p. 357 et suiv.
(**) Voir le mémoire de M. Abraham (*Annales des Mines*, septembre 1898, page 248).

Digitized by Google

temps que par son allongement à la rupture beaucoup plus grand. C'est pour obtenir cette amélioration de la qualité qu'il a été fait une forte addition de chrome, et que les teneurs en carbone et en manganèse ont été considérablement augmentées.

Le premier acier NC-4 ainsi défini ayant été obtenu par tâtonnements, nous avons cherché à nous rendre compte du mode d'action de chacun des éléments le constituant, et, par extension, de l'influence du carbone, du manganèse ou du chrome sur les propriétés physiques et mécaniques des aciers au nickel de toutes teneurs contenant de notables proportions de ces trois éléments.

Influence des mêmes éléments sur l'état allotropique des aciers au nickel. — Le carbone, le manganèse et le chrome ont, tous trois, une influence considérable sur les conditions dans lesquelles se produit la transformation irréversible au refroidissement, influence qui est même plus grande que celle du nickel lui-même.

L'étude des aciers au nickel proprement dits a mis en évidence l'influence prépondérante de la position du point de transformation allotropique au refroidissement, et a particulièrement attiré l'attention sur les modifications considérables que subissent les propriétés physiques et mécaniques lorsque ce point de transformation s'abaisse au-dessous de la température ordinaire. Une étude des propriétés physiques et mécaniques de l'acier NC-4, semblable à celle que nous avons faite pour les aciers au nickel proprement dits, démontre qu'il doit la plupart de ses propriétés particulières à la position très basse de son point de transformation irréversible au refroidissement.

L'acier au nickel NC-4 n'est pas magnétique; or les aciers au nickel proprement dits sont tous magnétiques, il en diffère donc notablement. Son très grand allongement et plusieurs autres propriétés mécaniques très accen-

Digitized by Google

tuées l'éloignent aussi des aciers au nickel proprement dits ; il n'en doit pas moins être considéré comme faisant partie du même groupe que ceux de ces aciers qui n'ont pas subi la transformation irréversible ; une intéressante expérience nous l'a démontré dès le début de nos recherches.

Nous avons pu, grâce à l'obligeant intermédiaire de M. Ch.-Ed. Guillaume, qui a remis à Londres des échantillons de notre acier NC-4 à M. J. Dewar, l'éminent professeur à la Royal Institution, profiter, dès le mois de mai 1897, du refroidissement intense produit par l'air liquide. A la température de — 188°, le magnétisme n'a pas apparu, si ce n'est dans un échantillon moins chargé que les autres en carbone, chrome et manganèse, qui s'est quelque peu transformé. Cette expérience a permis d'attribuer l'absence du magnétisme et les propriétés mécaniques particulières de cet acier à un abaissement très considérable du point de transformation irréversible au refroidissement.

On est ainsi amené à admettre que le carbone, le manganèse et le chrome ont, comme le nickel, non seulement une action directe résultant de leurs propriétés particulières, mais encore une action indirecte résultant de leur influence sur l'état allotropique de l'acier, et que cette dernière action est généralement prépondérante. C'est pourquoi nous donnerons, dans la suite de notre exposé, la première place aux recherches relatives à l'état allotropique.

Il ne suffit pas de constater l'influence du carbone, du manganèse et du chrome agissant simultanément, il convient de mettre en évidence l'action particulière de chacun de ces trois éléments ; nous rendrons compte successivement de nos recherches relatives aux trois catégories d'aciers qui suivent : aciers au nickel carburés, aciers au nickel chromés et aciers au nickel manganésés.

Digitized by Google

PREMIÈRE CATÉGORIE.

ACIERS AU NICKEL CARBURÉS.

État allotropique. — Pour mettre en évidence l'influence du carbone sur l'état allotropique des aciers au nickel, il a été constitué des groupes dans lesquels la teneur en nickel varie peu. Chaque groupe commence par un acier au nickel très peu carburé, après quoi les échantillons sont classés par ordre de teneurs en carbone croissantes.

L'ordre des groupes est celui des teneurs en nickel décroissantes, en commençant par la teneur de 31 p. 100, limite au-dessus de laquelle il n'a pas été possible de produire la transformation irréversible.

Position des points de transformation. — L'état allotropique des échantillons a seulement été constaté aux trois températures qui suivent : 1° + 15°, température ordinaire ; 2° — 78°, température produite au moyen de la neige carbonique ; 3° — 188°, température obtenue par l'immersion dans l'air liquide. Le tableau XV donne l'état magnétique à ces trois températures ; il est facile d'en déduire entre quelles limites est compris le point de transformation au refroidissement : sa position est soit supérieure à + 15°, soit comprise entre + 15° et — 78°, soit comprise entre — 78° et — 188°, soit inférieure à — 188°.

Ces constatations suffisent pour mettre en évidence l'influence du carbone sur la position des points de transformation.

Digitized by Google

TABLEAU XV.

DÉSIGNATION des groupes	DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN Carbone	TENEURS EN Nickel	ÉTAT MAGNÉTIQUE A
I	(76)	0.093	30.44	+ 15° magnétique réversible. — 78° Id. Id. — 188° Id. irréversible.
	(77)	0.155	31.04	+ 15° Id. réversible. — 78° Id. Id. — 188° Id. Id.
II	(71)	0.110	28.82	+ 15° Id. Id. — 78° Id. irréversible.
	(73)	0.322	29.76	+ 15° Id. réversible. — 78° Id. Id.
III	(64)	0.063	26.34	+ 15° Id. irréversible.
	(62)	0.328	25.38	+ 15° très faiblement magnétique. — 78° magnétique irréversible.
	(60)	0.617	25.25	+ 15° très faiblement magnétique. — 78° magnétique réversible.
IV	(52)	0.151	24.06	+ 15° Id. irréversible.
	(50)	0.343	24.04	+ 15° Id. Id.
	(57)	0.415	24.65	+ 15° non magnétique. — 78° magnétique irréversible (*).
	(56)	0.640	24.61	+ 15° non magnétique. — 78° magnétique irréversible (*).
	(46)	0.850	23.35	+ 15° non magnétique. — 78° Id. — 188° magnétique irréversible.
V	(26)	0.162	15.92	+ 15° Id. Id.
	(27)	0.730	15.92	+ 15° très faiblement magnétique. — 78° magnétique irréversible.
	(19)	1.027	14.44	+ 15° très faiblement magnétique. — 78° magnétique irréversible.
	(25)	1.130	15.88	+ 15° non magnétique. — 78° Id. — 188° magnétique irréversible.
	(21)	1.360	14.80	+ 15° non magnétique. — 78° Id.
VI	(10)	0.107	9.92	+ 15° magnétique irréversible.
	(11)	1.370	10.00	+ 15° non magnétique. — 78° très legérement magnétique. — 188° magnétique irréversible.

(*) La transformation irréversible ne se produit à — 78° que lorsque l'acier a été trempé.

Dans le groupe I, teneurs en nickel de 30 à 31 p. 100, une très petite proportion de carbone, 0,155 p. 100, abaisse le point de transformation irréversible, assez pour qu'il ne puisse pas être atteint même si l'on a recours à l'air liquide.

Une proportion de carbone notablement plus élevée, 0,322 et 0,617 p. 100, est déjà nécessaire dans les

Digitized by Google

groupes II et III, teneurs en nickel de 29 et 26 p. 100 environ, pour abaisser ce point de transformation au-dessous de — 78°.

Le groupe IV, teneurs en nickel de 24 p. 100 environ, met en évidence un mouvement rapide d'abaissement du point de transformation, qui, après avoir dépassé + 100° pour l'échantillon (52) (Voir tableau IX), lorsque la proportion de carbone est de 0,151 p. 100, descend successivement au-dessous de la température ordinaire lorsqu'elle atteint 0,415 p. 100, puis au-dessous de — 78°, et même de — 188° lorsqu'elle atteint 0,850 p. 100.

Ce mouvement d'abaissement est encore plus manifeste dans le groupe V, teneurs en nickel de 15 p. 100 environ; les aciers deviennent non magnétiques à la température ordinaire, lorsque la teneur en carbone dépasse 1 p. 100; l'échantillon (25) est même non magnétique à — 78°, mais sa teneur en manganèse est élevée, environ 2 p. 100.

Le groupe VI ne contient que deux échantillons, un acier magnétique à la température ordinaire et un acier non magnétique à cette température, ce qui suffit pour faire constater qu'il existe un acier au nickel à 10 p. 100 non magnétique. Et même l'échantillon (11) à 1,37 p. 100 de carbone et 2,713 p. 100 de manganèse ne subit nettement la transformation irréversible que dans l'air liquide, c'est-à-dire que 10 p. 100 de nickel, 1,37 p. 100 de carbone et 2,713 p. 100 de manganèse équivalent à 30,44 p. 100 de nickel, 0,093 p. 100 de carbone et 0,315 p. 100 de manganèse au point de vue de la position du point de transformation irréversible au refroidissement.

Action du carbone. — Il résulte de ces constatations que quelques millièmes de carbone suffisent pour abaisser le point de transformation de plusieurs centaines de degrés. Le carbone joue le même rôle que le nickel au

Digitized by Google

point de vue de l'abaissement du point de transformation ; mais son action est beaucoup plus intense à teneur égale. Il semble qu'une unité de carbone produise le même abaissement que 20 unités de nickel.

Cette propriété du carbone a déjà été mise en évidence par M. Osmond (*) dans ses expériences classiques sur l'*austénite*, acier composé exclusivement de fer et de carbone, non magnétique à la température ordinaire. Cet acier se transforme et devient magnétique lorsqu'il est immergé dans l'air liquide, et reste transformé au retour à la température ordinaire ; la transformation se manifeste aussi, dans ce cas, par une augmentation du volume et de la dureté.

Donc, le carbone seul peut, comme le nickel, donner à l'acier la propriété de subir la transformation irréversible, avec abaissement du point de transformation au refroidissement jusqu'à — 150° environ ; on voit qu'il conserve cette propriété lorsque l'acier contient du nickel.

Mais un artifice est nécessaire pour maintenir uniformément réparti, dans l'acier ne contenant pas de nickel, la proportion de carbone qui produit l'austénite ; M. Osmond n'a pu y parvenir qu'en ayant recours à la trempe, et n'a même pu obtenir par ce traitement qu'un mélange d'acier non magnétique et d'acier magnétique contenant environ moitié d'austénite.

En présence du nickel, le carbone reste uniformément réparti dans l'acier, d'où l'obtention facile d'un métal non magnétique à la température ordinaire, sans recourir à l'artifice de la trempe. Cependant l'incorporation d'une proportion de carbone élevée n'est possible qu'avec l'aide d'une proportion notable de manganèse, qui doit être de plus en plus forte à mesure que la proportion de carbone

(*) *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXI, p. 684, novembre 1895 ; — et *Comptes Rendus*, t. CXXVIII, p. 1395, juin 1899.

Digitized by Google

augmente. Il en résulte que les aciers au nickel carburés deviennent en même temps, dans une certaine mesure, des aciers au nickel manganésés. C'est pourquoi nous n'avons pas poussé plus loin que 10 p. 100 l'abaissement de la teneur en nickel sans faire intervenir un nouvel auxiliaire, le chrome.

Il n'en est pas moins démontré que, sous réserve de la difficulté qu'on éprouve à l'incorporer dans l'acier, le carbone doit être considéré comme produisant, de même que le nickel et plus que lui, l'abaissement du point de transformation au refroidissement ; d'où la possibilité d'obtenir sans chrome des aciers au nickel non magnétiques à la température ordinaire, comme l'NC-4, c'est-à-dire ne subissant la transformation irréversible qu'à température très basse, et ne l'ayant par conséquent pas subie à la température ordinaire.

Action de la trempe et de l'écrouissage. — La trempe et la déformation à froid ont, sur les aciers au nickel carburés, la même action que sur les aciers au nickel proprement dits ; ces traitements tendent à détruire l'hystérèse.

Les échantillons (57) et (56) (Voir tableau XV) ne subissent la transformation irréversible à — 78° qu'après avoir été trempés ; la trempe relève leurs points de transformation.

L'échantillon (47) à 23,40 p. 100 de nickel, 0,482 p. 100 de carbone et 0,453 p. 100 de manganèse, trempé, puis refroidi à — 78°, accuse la perte du magnétisme à 525°. Le magnétisme reparaît à 310°, et augmente lentement d'intensité à mesure que la température s'abaisse ; l'aiguille aimantée ne s'oriente perpendiculairement à la direction du champ terrestre qu'à 160°. Cet acier non trempé ne subit pas la transformation irréversible au-dessus de — 78° ; le relèvement du point de transformation au refroidissement, produit par la trempe, est très considérable.

Digitized by Google

Propriétés mécaniques. — *Essais à la traction.* — Des essais à la traction, auxquels a été soumise cette série d'échantillons, permettent de se rendre compte de l'effet produit par l'augmentation de la teneur en carbone sur les propriétés mécaniques, dans chacun des groupes qui viennent d'être étudiés au point de vue de leur état allotropique.

Les échantillons ont été essayés trempés et non trempés.

Les résultats de ces essais forment le tableau XVI.

Les échantillons des groupes I et II, teneurs en nickel de 30 à 31 p. 100 et de 28 à 29 p. 100, qui, à la température ordinaire, n'ont pas subi la transformation irréversible, sont des aciers du type métal doux à limite d'élasticité et résistance à la rupture peu élevée, s'abaissant encore considérablement par la trempe. Dans ces conditions, la variation de la teneur en carbone n'a pas d'influence considérable.

Dans le groupe III, teneurs en nickel de 25 à 26 p. 100, l'un, des échantillons (64), exceptionnellement peu carburé, 0,063 p. 100 de carbone, a subi la transformation irréversible malgré sa teneur en nickel élevée; l'autre, (60), qui contient 0,617 p. 100 de carbone, ne l'a pas subie; les propriétés mécaniques de ces deux aciers sont fondamentalement différentes.

Non trempé, l'échantillon (64) n'accuse que 7 p. 100 d'allongement à la rupture, tandis que l'échantillon (60), dans les mêmes conditions, en accuse 40 p. 100. Après trempe, l'échantillon (64) devient, probablement par suite de tapures, tellement fragile(*) qu'il se rompt sous une faible charge, sans allongement, tandis que l'échantil-

(*) Les résultats de l'essai à la traction de cet échantillon après trempe n'ont pas été inscrits au tableau XVI, mais ce tableau donne ceux d'un essai à la traction de cet acier après recuit à 400°, d'où il résulte que l'absence presque complète de carbone a pour conséquence des relèvements très considérables de la limite d'élasticité et de la résistance à la rupture.

Digitized by Google

TABLEAU XVI.

DÉSIGNATION des groupes	DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN Carbone	TENEURS EN Nickel	TRAITEMENTS subis par les échantillons	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION Limites d'élasticité	Résistances à la rupture	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
					kil.	kil.		
I	(76)	0.09	30.44	non trempé	35,8	50,2	19,0	71
				trempé	27,3	45,3	28,5	69
II	(71)	0.11	28.82	non trempé	33,8	51,7	34,0	64
				trempé	18,4	47,0	32,0	65
	(73)	0.32	29.76	non trempé	44,5	67,9	33,0	57
				trempé	31,5	59,2	34,0	61
III	(64)	0.06	26.34	non trempé	54,6	82,6	7,0	36
				recuit à 400°	125,5	146,0	2,5	»
	(60)	0.61	25.25	non trempé	50,8	83,0	40,0	57,5
				trempé	38,8	72,7	59,3	77,5
IV	(52)	0.15	24.06	non trempé	49,3	97,2	24,3	48
				trempé	44,7	102,1	28,3	50
	(50)	0.34	24.04	non trempé	46,4	111,0	20,0	24,1
				trempé	53,5	101,5	26,0	47
	(57)	0.41	24.65	non trempé	8,3	74,2	37,0	68
				trempé	31,3	63,9	51,7	74,5
	(56)	0.64	21.61	non trempé	46,0	85,0	45,0	46
				trempé	34,3	74,1	58,4	49
	(46)	0.85	23.35	non trempé	46,1	77,0	38,4	60
				trempé	44,8	70,5	40,0	42
V	(26)	0.16	15.92	non trempé	107,0	123,0	6,7	16,4
				recuit à 400°	76,2	89,2	19,0	54,5
	(27)	0.73	15.92	non trempé (*)	34,8	68,2	8,0	8,5
				trempé	35,3	64,5	16,5	23
	(19)	1.02	14.44	non trempé (*)	42,8	67,3	9,0	»
				trempé	29,9	68,3	23,0	26
	(25)	1.13	15.88	non trempé	36,6	71,9	17,0	15,5
				trempé (*)	37,4	69,5	23,5	23
	(21)	1.36	14.80	non trempé	42,8	88,9	32,0	29
				trempé	?	67,3	6,0	»
VI	(10)	0.10	9.92	non trempé	67,4	75,1	20,4	53,7
				trempé	70,5	76,6	18,0	63
	(11)	1.37	10.00	non trempé (*)	41,0	49,8	5,0	»
				trempé (*)	34,0	61,2	12,0	15

(*) Eprouvettes rompues hors repères.

Digitized by Google

lon (60) s'adoucit par la trempe, à tel point que son allongement à la rupture passe de 40 p. 100 à 59,3 p. 100, et que sa limite d'élasticité descend de 50,8 kilogrammes par millimètre carré à 38,8 kilogrammes; sa résistance à la rupture, de 83 kilogrammes par millimètre carré, à 72,7 kilogrammes. Il est difficile de mieux mettre en évidence l'action très considérable que peut avoir dans certains cas le carbone, accompagné, il est vrai, d'un peu de manganèse, sur les propriétés mécaniques de l'acier. On remarquera, notamment, que l'acier (64) est sec et le devient encore davantage par la trempe, tandis que l'acier (60), relativement doux, devient encore plus doux par la trempe.

Dans le groupe IV, teneurs en nickel de 24 p. 100 environ, les deux premiers échantillons, (52) et (50), ont subi la transformation irréversible, mais leurs points de transformation ne sont pas très éloignés de la température ordinaire ; c'est pourquoi la trempe ne modifie pas beaucoup les limites d'élasticité et les résistances à la rupture, et augmente un peu les allongements p. 100 à la rupture.

Il n'en est plus de même lorsque la teneur en carbone continue à augmenter. Les aciers (57) et (56), teneurs en carbone 0,415 et 0,640, non magnétiques à la température ordinaire, se font remarquer par leurs grands allongements à la rupture; ils s'adoucissent nettement par la trempe.

Le dernier échantillon du groupe (46), dont la teneur en carbone et la teneur en manganèse, 0,850 et 1,415, deviennent élevées, et qui ne subit pas la transformation irréversible, même dans l'air liquide, s'adoucit encore par la trempe, mais son allongement p. 100 à la rupture est moindre que celui des échantillons précédents, et sa limite d'élasticité est plus élevée. L'influence durcissante du carbone tend à se manifester; il est vrai que celle du manganèse vient s'y ajouter.

Digitized by Google

Dans le groupe V, le premier échantillon, (26), qui ne contient que 0,162 de carbone, a nettement subi la transformation irréversible ; il accuse une limite d'élasticité et une résistance à la rupture élevées. Il n'a pas été soumis à la trempe qui l'aurait rendu sec, mais à un recuit à la température du bois étincelant, 380°, qui a relevé beaucoup son allongement à la rupture.

La teneur en carbone, portée à 0,730 p. 100 dans l'échantillon (27), a fait disparaître presque complètement le magnétisme à la température ordinaire. A cet abaissement du point de transformation correspond un abaissement considérable de la limite d'élasticité et de la résistance à la rupture, avec augmentation de l'allongement à la rupture. L'adoucissement de l'acier par la trempe est moins net que dans les groupes précédents ; cependant il est bien accusé pour les échantillons (19) et (25).

L'échantillon (21), pour lequel la teneur en carbone atteint 1,360 et la teneur en manganèse 2,072 p. 100, accuse encore un bel allongement à la rupture, 32 p. 100, avec 29 p. 100 de striction ; mais cet acier, comme d'ailleurs tous les aciers de ce groupe, sauf le premier, donne lieu à de nombreuses ruptures des éprouvettes hors repères, c'est-à-dire à des résultats irréguliers. On doit en conclure que l'introduction du carbone à haute dose, quoiqu'elle abaisse le point de transformation, et augmente par conséquent l'allongement, a une influence fâcheuse ; le carbone est loin d'avoir, au point de vue des propriétés mécaniques, la valeur du nickel, qu'il a très bien remplacé au point de vue de la transformation allotropique.

Le groupe VI, teneurs en nickel de 10 p. 100 environ, ne contient que deux échantillons : un acier à faible teneur en carbone, 0,107 p. 100, qui a subi la transformation irréversible à la température ordinaire, et un acier à très haute teneur en carbone, 1,370 p. 100, non magnétique

Digitized by Google

à la température ordinaire. Le premier est un acier du type à haute limite d'élasticité, qui durcit quelque peu par la trempe ; le meilleur traitement à lui faire subir est un recuit à la température du bois étincelant, 400° environ. Le second, qui se comporte très médiocrement à l'essai de traction (les deux éprouvettes se sont rompues hors repères), semble s'adoucir quelque peu par la trempe. C'est un acier de peu de valeur, quoique du type doux ; le seul intérêt qu'il présente est de démontrer que les aciers à 10 p. 100 de nickel peuvent avoir des teneurs en carbone aussi élevées que 1,37 p. 100, tout en conservant un allongement à la rupture notable, soit avant, soit après la trempe. Les aciers au nickel à teneurs en carbone élevées, c'est-à-dire dépassant 0,6 à 0,8 p. 100, ne sont pas des produits métallurgiques bien intéressants.

L'ensemble de ces résultats démontre que l'influence de l'état allotropique sur les propriétés mécaniques de ces aciers est tout à fait prépondérante.

Effet du refroidissement à 78°. — Nous donnons ci-après (tableau XVII) les résultats d'essais à la traction obtenus avec des éprouvettes des échantillons du groupe IV refroidies par immersion dans un bain de neige carbonique.

TABLEAU XVII.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN		TRAITEMENTS subis par les échantillons	RÉSULTATS DES ESSAIS DE TRACTION			
	Nickel	Carbone		Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements à la rupture p. 100	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
(52)	24.06	0,15	non trempé.	122,5	139,1	15	42
			trempe.....	115,9	133	15,7	41
(50)	24.04	0,34	non trempé.	120,9	141	5,7	13
			trempé.....	121,2	141,5	13,5	36,5
(57)	24.65	0,41	non trempé.	45,3	74,8	38,3	70
			trempé.....	77,4	110,8	13,3	29
(56)	24.61	0,64	non trempé.	35,2	67,5	33,3	41
			trempé.....	43,9	86,8	50,7	64
(46)	23.35	0,85	non trempé.	44,7	76	38,4	55
			trempé.....	38,3	71,5	51,7	44

Digitized by Google

Ces éprouvettes ont été préalablement trempées, ou pas trempées.

Si on compare ces résultats avec ceux qui ont déjà été obtenus avec les mêmes échantillons, et qui sont inscrits au tableau XVI, on constate que le refroidissement a beaucoup augmenté la limite d'élasticité et la résistance à la rupture des échantillons (52) et (50), en diminuant leurs allongements p. 100 à la rupture. Les essais à la traction de ces aciers, ainsi traités, donnent des résultats remarquables : haute limite d'élasticité, 120 kilogrammes environ par millimètre carré; haute résistance, 140 kilogrammes environ par millimètre carré, et bel allongement à la rupture, 15 p. 100 environ.

Un résultat semblable a été obtenu avec l'échantillon (57) trempé, tandis que ce même échantillon non trempé restait à peu près insensible au refroidissement; la trempe a relevé le point de transformation irréversible au refroidissement au-dessus de — 78°.

L'influence du refroidissement est à peu près nulle pour l'échantillon (56), dont le point de transformation reste au-dessus de — 78°.

Les résultats constatés permettent d'admettre que les aciers au nickel carburés, au moins ceux qui sont modérément carburés, se comportent au refroidissement comme des aciers au nickel proprement dits, dont le point de transformation a la même position sur l'échelle des températures.

Digitized by Google

DEUXIÈME CATÉGORIE.

ACIERS AU NICKEL CHROMÉS.

Utilité du chrome. — Les propriétés mécaniques médiocres de certains aciers au nickel fortement carburés paraissent avoir pour cause principale la difficulté avec laquelle le carbone s'incorpore dans ces aciers. Le manganèse, qui dissout le carbone beaucoup mieux que le fer, ne donne de bons résultats que lorsque la teneur en carbone est inférieure à 0,5 ou 0,6 p. 100; c'est ainsi qu'on a été amené à employer le chrome, qui est un dissolvant du carbone beaucoup plus puissant que le manganèse. Il a été reconnu que, généralement, l'introduction de 2 à 3 p. 100 de chrome améliore les propriétés mécaniques; ce métal a aussi été employé en proportions moindres et parfois en proportions plus fortes.

État allotropique. — *Position des points de transformation allotropique.* — Nous avons constitué des groupes de teneurs en nickel à peu près uniformes, dans lesquels nous avons inscrit les divers échantillons dans l'ordre de la position de leurs points de transformation irréversible au refroidissement. On constatera que cet ordre est presque exactement celui de la teneur en carbone, dont l'influence sur la position de ce point de transformation est prédominante.

Nous n'étudierons pour le moment que les aciers au nickel chromés pouvant subir la transformation irréversible; aussi limiterons-nous notre examen aux teneurs en nickel inférieures à 29 p. 100. Nous inscrivons les résultats obtenus au tableau XVIII, en suivant pour les groupes l'ordre des teneurs en nickel décroissantes Ce tableau

Digitized by Google

est semblable à celui que nous avons dressé pour les aciers au nickel carburés.

TABLEAU XVIII.

DÉSIGNATION des groupes	DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN Carbone	Chrome	Nickel	ÉTAT MAGNÉTIQUE A
I	(70)	0.105	0.555	28.80	+ 15° faiblement magnétique réversible. — 78° magnétique irréversible (*).
	(66)	0.626	2.535	27.16	+ 15° très faiblement magnétique réversible. — 78° magnétique réversible. — 188° magnétique réversible.
II	(40)	0.105	0.430	21.84	+ 15° magnétique irréversible.
	(38)	0.135	0.660	20.88	+ 15° Id.
	(43)	0.248	0.210	22.80	+ 15° Id.
	(41)	0.273	0.560	22.08	+ 15° Id.
	(37)	0.289	0.712	20.74	+ 15° Id.
	(39)	0.293	0.715	21.16	+ 15° non magnétique. — 78° magnétique irréversible.
	(35)	0.294	0.965	19.88	+ 15° non magnétique. — 78° magnétique irréversible.
	(44)	0.287	0.588	23.06	+ 15° non magnetique. — 78° magnétique irréversible.
	(49)	0.300	0.530	23.73	+ 15° non magnétique. — 78° magnétique irréversible.
	(34)	0.345	0.875	19.56	+ 15° non magnétique. — 78° magnétique irréversible.
	(45)	0.455	0.284	23.26	— 78° non magnétique. — 188° magnétique irréversible.
	(59)	0.600	2.593	24.80	+ 15° non magnétique. — 78° magnétique réversible.
	(55)	1.047	2.489	24.52	+ 15° non magnétique. — 78° magnétique réversible.
	(48)	1.453	2.715	23.40	+ 15° non magnétique. — 78° magnétique réversible.
III	(32)	0.070	2.740	17.24	+ 15° magnétique irréversible.
	(33)	0.193	0.980	17.50	+ 15° Id.
	(22)	0.329	2.830	15.08	+ 15° non magnetique. — 78° magnétique irréversible.
	(29)	0.397	1.750	16.06	+ 15° non magnétique. — 78° magnetique irréversible (*).
	(31)	0.505	1.770	16.68	+ 15° non magnétique. — 78° magnétique irréversible (*).
	(28)	0.535	3.020	16.05	— 188° non magnétique.
	(30)	0.706	2.025	16.16	— 78° Id.
IV	(13)	0.342	2.921	10.20	+ 15° magnétique irréversible.
	(15)	0.726	2.700	12.04	+ 15° non magnétique. — 78° magnétique irréversible (*).
	(18)	0.960	3.102	14.40	— 78° non magnétique.
	(16)	1.100	3.550	13.34	— 188° Id.
	(12)	1.252	2.786	10.16	— 78° Id.
V	(8)	1.773	3.188	7.28	— 188° Id.
VI	(4)	0.520	2.830	4.95	+ 15° magnétique irréversible.
	(5)	1.137	3.124	5.05	— 78° très faiblement magnétique.
VII	(3)	1.650	0.445	2.48	+ 15° Id. — 78° magnétique irréversible.

(*) Cet échantillon ne devient magnétique irréversible, à — 78°, que lorsqu'il a été trempé.

Digitized by Google

Dans le groupe I, l'échantillon (70) subit la transformation irréversible à — 78°, malgré la présence du chrome, en faible proportion, il est vrai, 0,255 p. 100, et aussi malgré la teneur élevée en nickel, 28,8 p. 100. Par contre, la teneur en carbone est très faible, 0,105 p. 100. L'échantillon (66) ne subit pas cette transformation, même dans l'air liquide, quoique la teneur en nickel ait diminué; les teneurs en carbone et en chrome sont beaucoup plus élevées.

L'échantillon (70) ne subit la transformation irréversible dans la neige carbonique que lorsqu'il a été soumis à la trempe; ce traitement relève le point de transformation irréversible au refroidissement, qu'il y ait ou non du carbone et du chrome.

Le groupe II, teneurs en nickel de 19,56 à 24,80 p. 100, comprend cinq échantillons, (40) à (37), ayant subi la transformation magnétique irréversible à la température ordinaire. On remarquera que leurs teneurs en carbone sont peu élevées, 0,105 à 0,280 p. 100, tandis que leurs teneurs en chrome atteignent jusqu'à 0,712 p. 100, ce qui montre que ce métal a par lui-même une influence peu considérable.

Les cinq échantillons qui suivent, (39) à (34), sont non magnétiques à la température ordinaire, mais subissent la transformation irréversible dans la neige carbonique; la position du point de transformation irréversible au refroidissement est comprise entre 0° et — 78°. La teneur en carbone s'élève jusqu'à 0,345, avec 0,875 de chrome.

L'échantillon (45) ne subit la transformation irréversible que dans l'air liquide; cependant la teneur en chrome s'est abaissée à 0,284 p. 100; mais la teneur en carbone s'est élevée à 0,455 p. 100.

Les trois derniers échantillons, dont les teneurs en carbone et en chrome sont beaucoup plus élevées, ne subissent pas la transformation irréversible dans la neige

Digitized by Google

carbonique, mais ils subissent la transformation réversible à — 78° ; le point de transformation réversible n'est pas abaissé par le chrome, dans le groupe II aussi bien que dans le groupe I.

Les deux premiers échantillons du groupe III, teneurs en nickel de 15,08 à 17,50 p. 100, ont subi la transformation irréversible à la température ordinaire ; cependant la teneur en chrome de l'échantillon (32), 2,740 p. 100, est très élevée, mais la teneur en carbone est très faible : 0,070 p. 100.

Les trois échantillons qui suivent, (22) à (31), sont non magnétiques à la température ordinaire, mais subissent la transformation irréversible dans la neige carbonique ; les deux derniers ne la subissent, à cette température, que lorsqu'ils ont été trempés, ce qui indique pour ces deux échantillons un abaissement du point de transformation plus grand que pour le précédent. La teneur en carbone atteint 0,505 p. 100 avec 1,770 de chrome.

L'échantillon (28) est non magnétique, même dans l'air liquide, quoiqu'il ne contienne que 16,05 p. 100 de nickel et 3,020 p. 100 de chrome et seulement 0,535 p. 100 de carbone. On voit que les proportions de ces trois éléments que contient l'acier dénommé à Imphy à l'origine NC-4 (*) sont plus que suffisantes pour abaisser le point de transformation irréversible au-dessous de — 188°.

Le groupe IV, teneurs en nickel de 10,16 à 14,40 p. 100, comprend un échantillon ayant subi la transformation irréversible, l'échantillon (13) à 2,921 p. 100 de chrome, ce qui est une proportion élevée, mais à 0,312 de carbone, ce qui est une proportion faible. L'échantillon (15), dont la teneur en chrome est à peu près la même et la teneur en carbone à peu près double, 0,726 p. 100, est non magnétique à la température ordinaire, et subit la

(*) Sa composition a été donnée page 447.

Digitized by Google

transformation irréversible dans l'air liquide, lorsqu'il a été trempé.

L'échantillon (18), dont les teneurs en carbone et en chrome sont un peu plus élevées, est non magnétique dans la neige carbonique. L'échantillon (16), dont la teneur en carbone est de 1,100 p. 100 et la teneur en chrome de 3,550 p. 100, est non magnétique, même dans l'air liquide.

Imphy a réussi à obtenir, groupe V, un acier au nickel à 7,28 p. 100 de nickel, non magnétique, même dans l'air liquide.

Le groupe VI, teneur en nickel de 5 p. 100 environ, contient deux échantillons, dont l'un a subi la transformation irréversible à la température ordinaire, tandis que l'autre ne la subit que très faiblement à — 78°; le premier, (4), a une teneur en carbone beaucoup plus faible, 0,520 p. 100, que celle du second, (5), qui est de 1,132 p. 100; les teneurs en chrome sont toutes deux de 3 p. 100 environ.

Les fortes additions de carbone et de chrome permettent d'obtenir des aciers non magnétiques à teneurs en nickel très faibles, mais elles durcissent beaucoup l'acier, quoiqu'elles le rendent non magnétique, à tel point qu'il devient impossible de l'usiner, même pour obtenir la limaille nécessaire pour faire l'analyse. Aussi a-t-il fallu limiter la proportion de chrome dans les aciers à teneurs en nickel très faibles et à teneurs en carbone très élevées. Imphy a obtenu un échantillon, (3), à peu près non magnétique à la température ordinaire, qui subit la transformation irréversible entre 0° et — 78°. Il ne contient que 2,16 p. 100 de nickel et 0,445 de chrome avec 1,650 de carbone.

Action du chrome. — De l'ensemble de ces résultats, il se dégage que les abaissements de points de transformation, dans le tableau qui vient d'être examiné, sont dus à l'action du carbone plutôt qu'à celle du chrome,

Digitized by Google

l'action du carbone devenant beaucoup plus intense en présence du chrome.

Ce rôle joué par le chrome se manifeste nettement dans les trois échantillons modérément carburés et plus fortement chromés (90), (91), (92), qui contiennent respectivement : 15,48, 15,50 et 24,20 p. 100 de nickel; 0,27, 0,29 et 0,31 p. 100 de carbone; 5,50, 9,05 et 5,29 p. 100 de chrome. Au point de vue de la teneur en nickel, deux d'entre eux appartiennent au groupe III et l'autre au groupe II. Le premier de ces aciers est non magnétique à la température ordinaire et à —78° ; le second est non magnétique à —188°, et le troisième magnétique réversible à cette dernière température.

Il est donc évident que le chrome abaisse le point de transformation irréversible au refroidissement d'autant plus qu'il est en proportion plus forte. Mais il est à remarquer que, même s'il n'avait aucune action par lui-même, le chrome agirait déjà dans ce sens simplement parce qu'il réduit la proportion du fer par rapport à celle du nickel ; son action ne peut donc être constatée nettement que si le nickel est éliminé.

Aciers au chrome sans nickel. — Le chrome seul abaisse-t-il les points de transformation irréversible ? Pour répondre à cette question, Imphy a préparé trois échantillons d'aciers à hautes teneurs en chrome, ayant des teneurs en carbone aussi faibles que possible et des teneurs en nickel à peu près nulles ; ce sont les échantillons (93), (94) et (95), dont les teneurs en chrome sont respectivement : 14,40, 21,06 et 29,21 p. 100.

Ces aciers sont tous trois très magnétiques à la température ordinaire. Imphy a déterminé au four chauffé électriquement la position de leurs points de transformation à l'échauffement et au refroidissement ; les résultats obtenus sont inscrits au tableau XIX :

Digitized by Google

TABLEAU XIX.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN		POSITIONS DES POINTS DE TRANSFORMATION	
	Carbone	Chrome	à l'échauffement	au refroidissement
(93)	0.36	14.40	715°	685°
(94)	0.87	21.06	675°	640°
(95)	0.62	29.21	620°	585°

On peut en conclure que les deux points de transformation s'abaissent très lentement à mesure que la teneur en chrome augmente, et qu'il se produit entre ces deux points de transformation un écart très faible. La transformation nous semble devoir être considérée comme étant du type irréversible, quoiqu'elle soit à très faible hystérèse. En effet, elle a les principaux caractères de la transformation irréversible des aciers au nickel, en particulier celui de se produire à des températures qui dépendent surtout de la teneur en fer.

Imphy a cherché à préparer des aciers contenant 40 p. 100 de chrome, mais n'a obtenu que des aciers non forgeables. Il semble que la solubilité du chrome dans le fer ne permette pas d'obtenir des aciers à 40 p. 100 de chrome dans les conditions réalisées au four à creuset. Nous avons dû, par conséquent, nous borner à suivre l'abaissement des points de transformation irréversible jusqu'à 29,21 p. 100 de chrome, teneur qui est bien loin d'être assez élevée pour amener le point de transformation au refroidissement au-dessous de la température ordinaire.

L'abaissement très lent de ce point de transformation est en grande partie la conséquence du peu d'intensité de l'hystérèse, contrairement à ce qui se produit avec le nickel et le manganèse. Mais, précisément parce qu'il ne se produit pas d'hystérèse notable, on doit, croyons-nous, attribuer à l'action du chrome seul l'abaissement des

Digitized by Google

points de transformation qui est constaté au tableau XIX, quoique les teneurs en carbone des trois échantillons soient de celles qui abaissent très fortement les points de transformation irréversible des aciers au nickel chromés. En effet, un écart très grand entre les points de transformation à l'échauffement et au refroidissement accompagnant toujours l'abaissement produit par le carbone, il ne peut pas être considéré comme la cause d'un abaissement des deux points de transformation se produisant sans écart notable entre ces deux points.

Cet élément existe, par conséquent, à un état tout particulier dans les aciers à hautes teneurs en chrome. Cet état particulier a été étudié par M. Osmond, dans un important mémoire (*) rendant compte de recherches relatives à une série d'aciers contenant de 0,29 à 9,18 p. 100 de chrome. Elles font connaître des modifications considérables de la structure, produites par les recuits à très hautes températures, et détruites par le forgeage, qui rétablit la structure primitive. Ces modifications sont attribuées par M. Osmond à des modifications de l'état du carbone dissous de plus en plus dans l'acier, à mesure que la température s'élève, tandis que, sous l'influence du forgeage, il se concentre en certains points par liquation, à l'état de carbure de fer et de chrome. Il en résulte que les points de transformation au refroidissement de ces aciers s'abaissent sous l'influence d'échauffements à températures croissantes. Il convenait donc de se rendre compte de l'influence de ce traitement sur la position des points de transformation de nos aciers à teneurs en chrome plus fortes ; en conséquence, nous avons fait de nouvelles déterminations des points de transformation des échantillons (94) et (95) en les soumettant à des températures

(*) *Recherches sur les aciers chromés* (Extrait du *Mémorial de l'Artillerie de marine*, 1893).

Digitized by Google

de plus en plus élevées. Les résultats obtenus ont été inscrits au tableau XX.

TABLEAU XX.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS en		CHAUFFAGE		REFROIDISSEMENT	
	Carbone	Chrome	Disparition du magnétisme	Température atteinte à l'échauffement	Apparition du magnétisme	Température atteinte au refroidissement
(94)	0.87	21.06	675°	720°	640°	550°
			660°	800°	620°	515°
			660°	900°	612°	515°
			670°	1000°	590°	515°
			630°	1100°	585°	
(95)	0.62	29.21	620°	700°	585°	500°
			615°	800°	565°	500°
			605°	900°	560°	500°
			615°	1000°	555°	500°
			620°	1100°	555°	480°
			620°	1200°	545°	

Ces échantillons se comportent comme les aciers à teneurs inférieures à 10 p. 100 de chrome que M. Osmond a étudiés. Les points de transformation au refroidissement s'abaissent bien de plus en plus, à mesure que le refroidissement se produit à partir d'une température plus élevée, tandis que les points de transformation à l'échauffement restent à peu près fixes, ce qui correspond à une augmentation de l'hystérèse, augmentation d'ailleurs très faible.

Ces constatations nous conduisent à admettre décidément que le chrome, par lui-même, sans l'aide du carbone, abaisse les points de transformation des aciers au chrome, mais les abaisse très lentement.

Cette action directe du chrome sur les points de transformation s'ajoute probablement à celle du nickel lorsque le chrome lui est associé, mais elle est si faible qu'elle devient négligeable relativement à son action indirecte par l'intermédiaire du carbone, action qui est accompagnée de beaucoup d'hystérèse. C'est donc presque exclusivement

Digitized by Google

cette action indirecte qui rend le chrome si utile dans la préparation des aciers au nickel.

L'action prépondérante appartient bien au carbone, car, pour qu'il y ait abaissement considérable du point de transformation au refroidissement, il est indispensable que la teneur de cet élément soit notable. Cela résulte nettement de la comparaison des deux échantillons suivants : 1° l'échantillon (32), très magnétique à la température ordinaire, quoiqu'il contienne 17,24 p. 100 de nickel et 2,74 p. 100 de chrome. Mais la teneur en carbone est extrêmement faible, 0,070 p. 100, et, quoique son activité soit exaltée par la présence d'une forte quantité de chrome, elle est trop faible pour abaisser considérablement le point de transformation. 2° Au contraire, l'échantillon (35), qui ne contient que 0,965 p. 100 de chrome et seulement 19,88 p. 100 de nickel, est non magnétique à la température ordinaire, parce qu'il contient 0,294 p. 100 de carbone, proportion peu élevée, mais suffisante, grâce à l'action du chrome sur le carbone.

Positions des points de transformation des aciers au nickel chromés après trempe et écrouissage. — Nous avons eu déjà l'occasion de signaler plusieurs échantillons qui, non trempés, ne subissent pas la transformation irréversible lorsqu'ils sont refroidis au moyen de la neige carbonique, et la subissent dans ces mêmes conditions lorsqu'ils ont été trempés. La trempe agit sur ces aciers au nickel chromés comme sur les aciers au nickel proprement dits.

Imphy a déterminé au four chauffé électriquement la position des points de transformation à l'échauffement et au refroidissement de quatre échantillons qui ont été soumis à la trempe ou à la trempe suivie de l'écrouissage.

Le tableau XXI donne les résultats de ces déterminations.

Digitized by Google

TABLEAU XXI.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN			TRAITEMENTS subis par les échantillons	POSITIONS DES POINTS DE transformation	
	Carbone	Chrome	Nickel		à l'échauffement	au refroidissement
(39)	0.293	0.71	21.16	trempé.....	565°	545°
(35)	0.294	0.96	19.88	Id.	570°	540°
(29)	0.397	1.75	16.06	trempé et écroui.	620°	280°
(15)	0.726	2.70	12.04	Id.	650°	590°

Les échantillons (39) et (35), qui ne subissent pas la transformation irréversible dans la neige carbonique, la subissent lorsqu'ils y sont immergés après avoir été trempés. La trempe a, en outre, pour effet d'annuler presque entièrement le retard à l'apparition du magnétisme, qui est la mesure de l'hystérèse; ce retard n'est plus que de 20 degrés pour l'échantillon (39) et de 30 degrés pour l'échantillon (35).

La comparaison des résultats de ces déterminations avec ceux qui ont été obtenus avec les aciers au nickel proprement dits trempés et écrouis, inscrits au tableau XII, montre que les échantillons (39) et (35), quoique ne contenant que 21,16 et 19,88 p. 100 de nickel, font partie de la catégorie des aciers les plus sensibles à l'action de la trempe ; le magnétisme reparaît très rapidement à la température du point de transformation au refroidissement, relevé à peu de distance du point de transformation à l'échauffement. Or ces conditions ne se réalisent pour les aciers au nickel proprement dits que lorsque la teneur en nickel est d'au moins 27 p. 100.

Il en est à peu près de même pour l'échantillon (15); il appartient à cette même catégorie d'aciers, quoique ne

Digitized by Google

contenant que 12,04 de nickel, mais avec 0,726 de carbone.

L'échantillon (29) à 16,06 p. 100 de nickel, 1,75 de chrome et 0,397 p. 100 de carbone, fait partie de la catégorie des aciers qui ne sont sensibles que partiellement à l'action de la trempe et de la déformation à froid ; l'aiguille aimantée, qui accuse l'apparition du magnétisme, se met en mouvement à 280° pour n'arriver à être perpendiculaire à la direction du champ terrestre qu'à 50°. Ces conditions sont, pour les aciers au nickel proprement dits, celles des teneurs comprises entre 21 et 27 p. 100.

De ces dernières constatations, comme des précédentes, il résulte que le carbone, accompagné de chrome, produit, à teneur égale, beaucoup plus d'hystérèse que le nickel.

Le grand abaissement du point de transformation au refroidissement, produit par l'ensemble de ces deux éléments, est dû surtout à l'écart énorme qui se produit par hystérèse pour ces aciers entre le point de transformation à l'échauffement et le point de transformation au refroidissement.

Propriétés mécaniques. — *Essais à la traction.* — Nous avons soumis à des essais à la traction les échantillons que nous venons d'étudier au point de vue de la transformation allotropique. Les résultats de ces essais sont donnés au tableau XXII (p. 474-475).

Les échantillons du groupe I n'ont pas subi la transformation irréversible à la température ordinaire ; ils sont donc du type acier à grand allongement à la rupture. On remarquera l'influence favorable du chrome, qui, à faible teneur, 0,555 p. 100, dans l'échantillon (70), et à teneur élevée, 2,535 p. 100, dans l'échantillon (66), relève la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, et même l'allongement à la rupture dans les échantillons trempés.

Digitized by Google

La haute résistance à la rupture de l'échantillon (66) paraît due aux teneurs en carbone et en chrome.

Le groupe II forme un ensemble d'échantillons très intéressant au point de vue des applications. Il est heureux que nous ayons pu ne pas nous borner à les essayer à la traction ; en effet, les essais de choc sur barrettes entaillées, suivant la méthode de M. Frémont, mettent encore mieux en évidence, on le verra plus loin, l'amélioration de la qualité produite par l'addition d'une proportion faible ou forte de chrome.

Les échantillons (40) et (37), qui ont subi la transformation irréversible à la température ordinaire, forment un premier sous-groupe bien caractérisé par sa haute limite d'élasticité et sa haute résistance à la rupture ; l'allongement est resté considérable, l'influence du chrome, à la proportion de 5 à 8 millièmes, est évidemment favorable au point de vue des propriétés mécaniques.

A mesure que la teneur en carbone augmente, c'est-à-dire à mesure que le point de transformation se rapproche de la température ordinaire, la transformation irréversible devient moins complète, et les propriétés mécaniques se modifient en conséquence.

Les échantillons (39) et (35) présentent cette particularité que les résistances à la rupture sont plus élevées après trempe qu'avant trempe, quoique ces aciers soient du type acier à basse limite d'élasticité et à grand allongement, ce qui s'explique par le relèvement du point de transformation produit par la trempe. Leur qualité est bonne, quoique leur teneur en chrome soit un peu trop élevée.

En effet, les opérations (44) à (45), qui forment un autre sous-groupe, accusent une qualité tout à fait remarquable comme aciers à grand allongement à la rupture, en même temps que résistance à la rupture élevée. Leurs teneurs en chrome sont moindres que celles des deux

Digitized by Google

TABLEAU XXII.

DÉSIGNATION des groupes	DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN Carbone	Chrome	Nickel	TRAITEMENTS subis par les échantillons	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
						kil.	kil.		
I	(70)	0.10	0.55	28.80	non trempé	33,1	54	35,0	65
					trempé	21,1	52,6	41,7	70,4
	(66)	0.62	2.53	27.16	non trempé	49,2	95,9	25,0	32
					trempé	39,8	85,7	41,0	49
	(40)	0.10	0.43	21.86	non trempé	54,2	123,4	20,0	25,3
					trempé	54,8	115,0	21,5	35
	(38)	0.13	0.66	20.88	non trempé	42,2	117,8	24,7	32,2
					trempé	52,5	126,5	19,0	31
II	(43)	0.24	0.21	22.80	non trempé	52,6	116,5	23,4	33,1
					trempé	45,7	110,5	23,4	46,9
	(41)	0.27	0.56	22.08	non trempé	53,4	103,9	24,3	15,5
					trempé	41,1	102,4	25,0	43,7
	(37)	0.28	0.71	20.74	non trempé	45	102,2	20,0	23
					trempé	36,3	109,2	26,8	42
	(39)	0.29	0.71	21.16	non trempé	36,9	67,5	15,0	10,2
					trempé	31,4	101,1	28,3	17
	(35)	0.29	0.96	19.88	non trempé	39,2	89,6	16,6	21
					trempé	34,1	102,0	21,8	21
	(44)	0.28	0.58	23.06	non trempé	43,9	80,5	33,3	47
					trempé	30,9	71,8	35,0	41,5
	(49)	0,30	0.53	23.73	non trempé	32,7	69,0	38,4	51
					trempé	33,2	68,0	40,7	52
	(34)	0.34	0.87	19.56	non trempé	41,5	92,0	16,7	17
					trempé	47,3	112,1	15,0	38,7
	(45)	0.45	0.28	23.26	non trempé	42,0	72,7	40,0	64,2
					trempé	35,7	63,8	46,7	76,2
	(50)	0.60	2.59	24.80	non trempé	60,2	88,0	33,3	60
					trempé	48,9	79,3	33,3	64
	(55)	1.04	2.48	24.52	non trempé	56,0	92,8	32,5	31
					trempé	42,8	85,5	23,5	25

Digitized by Google

	(32)	0,07	2.74	17.24	non trempé	»	»	»	»
					trempé	105,3	129,2	8,0	37
	(33)	0,19	0.98	17.50	non trempé	120,1	147,5	3,3	3
					trempé	125,5	150,0	8,3	6,5
	(23)	0.25	2.80	15.36	non trempé	74,6	93,0	25,0	52
					trempé	40,4	73,4	39,5	62
	(22)	0.32	2.83	15.08	non tempé	42,3	78,0	13,5	22
					trempé	22,5	64,0	11,0	19
III	(29)	0.39	1.75	16.06	non trempé	48,2	75,2	18,3	11 (*)
					trempé	28,5	70,4	36,7	36,7
	(31)	0.50	1.77	16.68	non trempé	50,1	79,8	15,0	17,5
					trempé	30,8	85,3	28,4	21
	(28)	0.53	3.02	16.05	non trempé	58,7	88,5	45,6	63
					trempé	37,6	76,8	65,0	75
	(30)	0.70	2.02	16.16	non trempé	2	89,5	40,0	58,5
					trempé	39,4	74,4	52,7	43,8
	(24)	1.05	1.73	15.64	non trempé	69,5	94,0	40,0	37,7
					trempé	38,0	74,9	51,6	54
	(13)	0.31	2.92	10.20	non trempé	?	97,0	0	0
					trempé	?	84,0	0	0
	(15)	0.72	2.70	12.04	non trempé	58,5	70,1	10,0	8,6
					trempé	38,5	60,7	21,6	19
IV	(18)	0.96	3.10	14.40	non trempé	68,8	102,2	15,0	15,5
					trempé	57,1	97,0	46,5	30
	(16)	1.10	3.55	13.34	non trempé	84,5	103,6	13,4	»
					trempé	55	87,4	31,7	70
	(12)	1.25	2.78	10.16	non trempé	68	88,5	5,0	8
					trempé	47	79,5	22,5	26
V	(8)	1.77	3.18	7.28	non trempé	»	83,8	1,0	»
					trempé	58,9	80,4	5,0	»
VI	(4)	0.52	2.83	4.95	non trempé	»	109,0	0	»
					recuit à 400°	122,2	127,5	12,1	44
	(5)	1.13	3.12	5.05	non trempé	éprouvette rompue sous la charge initiale, pailleuse			
					trempé	»	61,3	1,5	
VII	(3)	1.65	0.44	2.18	non trempé	36,3	42,8	1	1 (*)
					trempé	32,2	44,3	1	1 (*)

(*) Eprouvette rompue hors repères.

Digitized by Google

opérations précédentes ; l'une d'elles, (45), n'a que 0,284 de chrome avec 0,455 de carbone, 0,665 p. 100 de manganèse et 23,26 de nickel ; elle peut cependant être signalée comme un excellent acier. On voit qu'une proportion de 0,3 à 0,4 p. 100 de carbone avec la quantité de chrome nécessaire pour l'incorporer améliore beaucoup la qualité des aciers au nickel à teneurs de 20 à 25 p. 100.

Les échantillons (59) et (55) forment un autre sous-groupe, caractérisé par des teneurs en carbone plus fortes et des teneurs en chrome beaucoup plus élevées, 2,5 p. 100 environ. Leurs limites d'élasticité et leurs résistances à la rupture sont plus élevées, leurs allongements à la rupture un peu moindres ; ce sont encore d'excellents aciers. L'acier qui a été dénommé à Imphy NC-4 (*) fait partie de ce sous-groupe.

Le groupe III, teneurs en nickel de 15,36 à 17,5 p. 100, comprend deux échantillons, (32) et (33), ayant subi la transformation irréversible, qui accusent des résistances à la rupture et des limites d'élasticité très élevées, jusqu'à 150 kilogrammes et 125,5 kilogrammes par millimètre carré respectivement. Les allongements à la rupture sont faibles ; ils ne dépassent pas de beaucoup 8 p. 100. C'est ce que faisait prévoir la position de leur point de transformation ; mais l'influence du chrome est sensible, il relève beaucoup les résistances, surtout celle de l'échantillon le plus carburé, quoiqu'il soit peu chromé.

L'échantillon (23) est très remarquable. Il est très magnétique, d'où une limite d'élasticité et une résistance à la rupture élevées, surtout avant trempe ; il accuse cependant des allongements à la rupture très élevés.

Les échantillons (22) à (30) sont non magnétiques à la température ordinaire, et accusent en conséquence de grands allongements à la rupture ; mais l'influence du

(*) Voir, page 447, la composition chimique de l'acier NC-4.

Digitized by Google

chrome a relevé leurs limites d'élasticité et leurs résistances à la rupture.

Nous signalerons particulièrement l'échantillon (28), qui est un véritable acier NC-4, quoiqu'il ne contienne que 16,05 p. 100 de nickel; mais il est à remarquer que son point de transformation est placé très bas, il n'a pas pu être atteint, même au moyen de l'air liquide. On voit que la teneur en nickel des aciers type NC-4 peut être abaissée beaucoup au-dessous de 20 p. 100.

Il est intéressant de comparer particulièrement les deux échantillons (23) et (28). Ces deux aciers ont respectivement pour teneurs en nickel : 15,36 et 16,05 p. 100, et pour teneurs en chrome : 2,80 et 3,02 p. 100, c'est-à-dire qu'ils ont sensiblement même composition chimique au point de vue du nickel et du chrome. Mais les teneurs en carbone sont respectivement : 0,257 et 0,535 p. 100, et les teneurs en manganèse : 0,129 et 0,828 p. 100; c'est assez pour que le premier soit magnétique et le second non magnétique.

Il en résulte des propriétés mécaniques très différentes :

A l'état non trempé, l'acier magnétique accuse une limite d'élasticité de 74,6 kilogrammes par millimètre carré, contre 58,7 kilogrammes pour l'acier non magnétique ; de même pour la résistance à la rupture : 93 kilogrammes par millimètre carré contre 88,5 kilogrammes. L'allongement à la rupture est moindre : 25 p. 100 contre 45,6 p. 100, de même que la striction : 52 contre 63 p. 100.

A l'état non trempé, la différence est beaucoup moins accusée pour les limites d'élasticité : $40^{kg},4$ par millimètre carré contre $37^{kg},6$, et pour les résistances à la rupture : $73^{kg},4$ par millimètre carré contre $76^{kg},8$, mais encore très grande pour les allongements à la rupture : 39,5 et 65 p. 100, et les strictions : 62 et 75 p. 100.

De plus, l'aspect des éprouvettes rompues est très dif-

Digitized by Google

férent; l'allongement est beaucoup plus localisé pour l'acier magnétique que pour l'acier non magnétique.

Dans le groupe IV, teneurs en nickel de 10,16 à 14,4 p. 100, un seul échantillon est magnétique : c'est l'échantillon (13), qui est très sec; la dureté produite par le chrome associé au carbone s'ajoute à celle que produit la transformation irréversible.

Les échantillons (15) et (16) sont non magnétiques à la température ordinaire; ils accusent jusqu'à 35 p. 100 d'allongement à la rupture après trempe; ce sont des aciers du type NC-4, quoique de qualité nettement inférieure. Le meilleur est l'échantillon (16) à 13,34 p. 100 de nickel.

La proportion élevée de carbone, de manganèse et de chrome de l'échantillon (12) ne compense pas suffisamment, au point de vue des propriétés mécaniques, la réduction de la teneur en nickel à 10,16 p. 100.

Les échantillons des groupes V, VI et VII n'ont aucune valeur au point de vue métallurgique; les résultats obtenus avec les aciers non magnétiques, très chargés en carbone, en manganèse et en chrome, mais à teneurs en nickel très réduites, montrent qu'il ne suffit pas d'abaisser le point de transformation au-dessous de la température ordinaire pour obtenir de l'allongement à la rupture. Tous ces aciers sont secs, qu'ils soient magnétiques ou non magnétiques, l'influence durcissante du chrome associé au carbone est trop prédominante. Cependant il se peut qu'en ayant recours à des traitements particuliers on puisse en tirer parti; le résultat obtenu en recuisant à 400° l'échantillon (4) :

Limite d'élasticité.....	122,2 kilogrammes par mm. carré.
Résistance à la rupture.....	127,5 — —
Allongement à la rupture..	12,1 p. 100
Striction $\frac{S - s}{S} \times 100$.....	44

Digitized by Google

permet de l'admettre; quoique *non trempé*, cet acier donne, après ce traitement, des résultats d'essais semblables à ceux d'un acier au carbone *trempé*.

Les trois coulées à teneurs en chrome plus élevées, dont nous avons fait connaître l'état magnétique, ont été aussi essayées à la traction. Les résultats obtenus sont donnés au tableau XXIII.

TABLEAU XXIII.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN			TRAITEMENTS subis par les échantillons	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
	Carbone	Chrome	Nickel		Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
					kil.	kil.		
(90)	0.27	5.50	15.48	non trempé..	50,8	79,7	32,5	40
				trempé.....	31,2	72,2	42,0	38
(91)	0.29	9.05	15.50	non trempé..	74,7	124,2	2,0	0
				trempé.....	82,0	101,0	1,0	»
(92)	0.30	5.28	24.20	non trempé..	61,5	76,2	22,5	47
				trempé.....	26,7	60,8	46	64

A la teneur de 5 p. 100, ce qui est le cas des échantillons (90) et (92), le chrome, associé à 3 millièmes de carbone, n'augmente que modérément la dureté du métal. On remarquera que la limite d'élasticité devient même très peu élevée après trempe.

Il n'en est pas de même lorsque la teneur en chrome s'élève à 9 p. 100, échantillon (91); quoique la teneur en carbone reste faible, 0,29 p. 100, l'acier est dur et durcit encore par la trempe.

Essais au choc. — Il ne suffit pas de constater à l'essai à la traction les remarquables propriétés mécaniques accusées par certains aciers au nickel carburés et chromés; nous avons remis à M. Frémont des échantillons de ces aciers, pour être essayés au choc sur barrettes entaillées,

Digitized by Google

suivant sa méthode. Les résultats qu'il a obtenus sont les suivants :

TABLEAU XXIV.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN Carbone	Chrome	Nickel	TRAITEMENTS subis par les échantillons	RÉSULTATS des essais sur barrettes entaillées de 8×10×30 mm.
					kilogrammètres
(4)	0.52	2.83	4.95	recuit à 400°	4,5
(23)	0.26	2.80	15.36	non recuit	7
(40)	0.10	0.43	21.84	id.	13
(15)	0.72	2.70	12.04	trempé 2 fois à 900°	7
(16)	1.10	3.55	13.34	id.	27
(22)	0.33	2.83	15.08	id.	36
(91)	0.29	9.05	15.50	id.	38,5
(18)	0.96	3.10	14.40	id.	29
(28)	0.53	3.02	16.05	non trempé	40 + x
				trempé 2 fois à 900°	40 + x
(29)	0.39	1.75	16.06	id.	40 + x
(30)	0.70	2.02	16.16	id.	40 + x
(31)	0.50	1.77	16.68	id.	33,5
	acier NC-4			non trempé	40 + x
				trempé 2 fois à 900°	40 + x

Les trois premiers échantillons ont subi la transformation irréversible, c'est pourquoi ils n'ont pas été essayés trempés. On voit que la résistance au choc de ces échantillons est faible; la fragilité est d'autant plus grande que la teneur en nickel est plus réduite et la teneur en chrome plus grande.

Les autres échantillons n'ont pas subi la transformation irréversible, d'où leur très grande résistance au choc, à l'exception d'un seul échantillon à teneur en nickel faible et à teneur en chrome assez élevée.

Nous ne saurions trop attirer l'attention sur les résultats exceptionnels obtenus avec les aciers à teneur en nickel de 16 p. 100 environ, non magnétiques, à fortes teneurs en carbone et en chrome, résultats dus à l'état allotropique de ces aciers.

L'appareil de M. Frémont ne pouvant développer plus

Digitized by Google

de 40 kilogrammètres, nous n'avons pas pu être fixés sur la valeur relative des aciers dont la résistance au choc dépasse ce nombre de kilogrammètres, d'où l'indication $40 + x$ du tableau.

Propriétés mécaniques des aciers au chrome sans nickel. — Les aciers au chrome sans nickel, qui ont été préparés en vue de l'étude de leurs transformations allotropiques, ont été essayés à la traction. Les résultats de ces essais sont inscrits au tableau XXV :

TABLEAU XXV.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN			TRAITEMENTS subis par les échantillons	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
	Carbone	Chrome	Nickel		Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
					kil.	kil.		
(93)	0.36	14.40	0.90	non trempé..	106,6	119,8	5,5	14
				trempé.....	rompu sous la charge initiale.			
(94)	0.87	21.06	0.72	non trempé..	54,0	59,0	0,5	»
(95)	0.62	29.21	1.40	non trempé..	41,3	68,8	3,0	3
				trempé.....	37,3	59,7	1,0	1

Ces renseignements très sommaires sont intéressants comme indication, au sujet de la part d'influence du chrome dans les aciers au nickel. Il en résulte que le chrome n'est pas lui-même un élément durcissant aussi énergique que le faisaient supposer les résultats obtenus avec les aciers au carbone à très faibles teneurs en chrome. A mesure que la teneur en chrome augmente, l'influence d'une teneur en carbone, telle que 0,6 p. 100, s'atténue.

Ces résultats, que nous avions déjà obtenus avant l'ouverture de l'Exposition de 1900, ont été confirmés par ceux que donne une série beaucoup plus complète d'échantillons qui a été exposée par la Société Jacob

Digitized by Google

Holtzer (*). Cette série accuse un relèvement progressif de la limite d'élasticité et de la résistance à la rupture, avec diminution de l'allongement à la rupture, à mesure que la teneur en chrome augmente. Le chrome agit dans le même sens que le carbone ou le nickel, mais moins énergiquement.

On voit que le chrome seul ne rend pas le métal dur et sec, c'est plutôt le carbone, associé au chrome, qui produit les effets attribués souvent au chrome seul.

Effets du refroidissement à — 78° sur les propriétés mécaniques des aciers au nickel chromés. — Nous donnons ci-après (tableau XXVI) les résultats d'essais à la traction qui ont été obtenus avec des éprouvettes de quelques-uns des échantillons déjà examinés, refroidies au moyen de la neige carbonique. Les échantillons soumis au refroidissement étaient soit non trempés, soit trempés.

L'échantillon (70) du groupe I ne se transforme dans la neige carbonique que lorsqu'il a été trempé; sa limite d'élasticité et sa résistance à la rupture augmentent et son allongement à la rupture diminue, mais la transfor-

(*) Les résultats obtenus par cette Société sont les suivants :

TENEURS EN		TRAITEMENTS subis par les échantillons	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
Carbone	Chrome		Limites d'élasticité par mm. carré	Résistance à la rupture par mm. carré	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S'}{s}$
0.37	4.90	recuit	28	50	24	0.240
		trempé et recuit	76.8	86,9	12	0.370
0.60	10.80	recuit	36	66,1	21,5	0,440
		trempé et recuit	66,8	85,5	12	0,536
0.45	14.50	recuit	40	71,4	18,5	0.500
		trempé et recuit	76,8	91,5	11,5	0,546
0.38	20.48	recuit	33,4	56,8	21.5	0,465
		trempé et recuit	43,4	63,4	19,5	0,515
0.45	26.50	recuit	46,1	66,4	18	0,621
		trempé sans recuit	43,4	63,7	20	0.500
0.49	30.10	recuit	48,2	65,4	19	0,620
		trempé sans recuit	45,4	61,4	19	0,650

Digitized by Google

mation est loin d'être complète, car les propriétés mécaniques sont peu modifiées.

TABLEAU XXVI.

DÉSIGNATION des groupes	DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN Carbone	Chrome	Nickel	TRAITEMENTS subis par les échantillons	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
						kil.	kil.		
I	(70)	0.10	0.55	28.80	non trempé	33,1	54,0	33,3	69,0
					trempé....	37,1	61,9	29,3	63,7
	(40)	0.10	0.43	21.84	non trempé	138,9	158,0	4,0	1,6
					trempé....	136,0	158,8	4,3	5,6
	(38)	0.13	0.66	20.88	non trempé	139,5	152,9	3,8	8,2
					trempé....	?	142,8	1,7	0
	(43)	0.24	0.21	22.80	non trempé	78,2	146,0	4,3	2,0
					trempé....	66,9	148,6	10,0	20,5
	(41)	0.27	0.56	22.08	non trempé	127,8	146,0	5,0	19,2
					trempé....	118,9	159,0	6,7	10,5
	(37)	0.28	0.71	20.74	non trempé	109,2	145,2	1,7	1,0
					trempé....	122,2	149,0	1,7	1,0
	(39)	0.29	0.71	21.16	non trempé	123,2	133,2	1,0	0
					trempé....	130	150,0	3,4	0,5
II	(35)	0.29	0.96	19.88	non trempé	?	122,6	1,0	0,8
					trempé....	91,6	148,5	6,7	2,2
	(44)	0.28	0.58	23.06	non trempé	113,8	131,6	18,3	33,0
					trempé....	102,6	137,0	20,3	21,5
	(49)	0.30	0.53	23.73	non trempé	70,0	121,6	18,3	29,0
					trempé....	102,5	129,5	16,7	40,0
	(34)	0.34	0.87	19.56	non trempé	117,7	144,5	3,3	28,2
					trempé....	?	136,6	0	0
	(45)	0.45	0.28	23.26	non trempé	43,4	73,0	41,7	70,8
					trempé....	39,2	66,2	47,3	76,2
	(59)	0.60	2.59	24.80	non trempé	64,2	89,9	32,7	64,0
					trempé....	?	84,0	36,7	60,0
	(33)	0.19	0.98	17.50	non trempé	?	142,2	0	0
					trempé....	?	127,2	0	0
	(29)	0.39	1.75	16.06	non trempé	48,3	76,0	3,3	3,7
					trempé....	74,7	92,2	1,7	0
	(31)	0.50	1.77	16.68	non trempé	?	100,5	1,7	0
III					trempé....	118,5	125,2	4,3	4,0
	(28)	0.53	3.02	16.05	non trempé	58,6	88,7	40,0	60,0
					trempé....	40,0	77,5	71,6	37,0
	(30)	0.70	2.02	16.16	non trempé	40,8	87,2	38,3	44,6
					trempé....	37,9	68,7	43,3	43,6
	(24)	1.05	1.73	15.64	non trempé	64,0	96,1	36,7	74,5
					trempé....	36,9	79,2	50,0	38,8
IV	(15)	0.72	2.70	12.04	non trempé	53,4	73,2	10,0	»
					trempé....	49,2	61,4	3,8	4,9
	(16)	1.10	3.55	13.34	non trempé	84,7	103,9	18,3	15,0
					trempé....	56,0	88,8	31,7	30,0

Au contraire, les échantillons (40) à (34), du groupe II, teneurs en nickel de 20 à 25 p. 100, subissent dans la

Digitized by Google

neige carbonique une transformation très intense; la limite d'élasticité s'élève jusqu'à 139,5 kilogrammes par millimètre carré et la résistance à la rupture jusqu'à 159 kilogrammes, l'allongement à la rupture restant supérieur à 3 p. 100 et la striction à 8. C'est un résultat très intéressant qui paraît de nature à être utilisé. On voit que la présence du chrome a une influence favorable sur la qualité des aciers durçis par refroidissement.

Nous signalerons particulièrement les opérations (44) et (49), qui joignent à de hautes résistances à la rupture et de hautes limites d'élasticité des allongements à la rupture de 18 à 20 p. 100. Ce sont des aciers à 23 p. 100 de nickel, 0,3 de carbone, 0,3 de manganèse et 0,5 de chrome.

Les échantillons (45) et (59), qui ne subissent pas la transformation irréversible à — 78°, donnent aux essais de traction les mêmes résultats qu'avant refroidissement.

Les aciers du groupe III, teneurs en nickel de 15 à 17 p. 100, accusent aussi un relèvement de la résistance à la rupture lorsqu'ils sont transformés par le refroidissement; mais ils deviennent beaucoup plus fragiles que ceux du groupe précédent, ce qui rend les résultats obtenus peu intéressants. Le meilleur est celui de l'échantillon (31) trempé, acier à 16,68 p. 100 de nickel.

Les échantillons (28), (30) et (24) n'ont pas été transformés, et donnent à peu près les mêmes résultats qu'avant transformation.

Dans le groupe IV, teneurs en nickel de 13 p. 100 environ, un seul des échantillons a été transformé par le refroidissement, c'est l'échantillon (15) trempé; les résultats de l'essai à la traction sont très médiocres. L'échantillon (16) donne les mêmes résultats qu'avant refroidissement.

On peut conclure de ces constatations que le refroidissement ne donne des résultats intéressants au point de

Digitized by Google

vue des applications que pour les aciers dont la teneur en nickel est supérieure à 20 p. 100.

Effets de l'étirage à froid sur les propriétés des aciers au nickel chromés. — L'écrouissage, résultant de l'étirage à froid, a parfois une influence semblable à celle du refroidissement à — 78°; par l'étirage, les aciers dont le point de transformation au refroidissement n'est pas situé beaucoup au-dessous de 0° deviennent magnétiques, et même magnétipolaires, sous l'influence que le champ terrestre exerce pendant qu'ils sont étirés.

Nous donnons comparativement, au tableau XXVII, des essais à la traction sur l'acier au nickel (44) après l'avoir soumis à divers traitements. Cet acier contient :

Carbone.....	0,287	p. 100
Manganèse.....	0,360	—
Chrome.....	0,588	—
Nickel.....	23,06	—

TABLEAU XXVII.

TRAITEMENTS SUBIS par les échantillons		RÉSULTATS DES ESSAIS DE TRACTION			
		Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements à la rupture p. 100	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
		kil.	kil.		
non trempé	non refroidi.....	43,9	80,5	33,3	47
	refroidi à — 78°...	113,8	131,6	18,3	33
trempé	non refroidi.....	30,9	71,8	35	41,5
	refroidi à — 78°.				
	après la trempe...	102,6	137	20,3	21,5
trempé et étiré à 75 p. 100 de sa longueur	non refroidi.....	129,5	139	13,3	28,2
	refroidi à — 78°.				
	après écrouissage.	141,5	149,5	12,7	32,1

Les effets produits par le refroidissement se superposent dans une certaine mesure à ceux qui sont produits par l'étirage.

On remarquera que l'étirage, suivi du refroidissement, élève considérablement la limite d'élasticité et la résis-

Digitized by Google

tance à la rupture, en maintenant un allongement p. 100 à la rupture et une striction encore très notables.

TROISIÈME CATÉGORIE.

ACIERS AU NICKEL MANGANÉSÉS.

Rôle du manganèse. — L'introduction du manganèse en notable proportion est nécessaire, lorsque la teneur en carbone s'élève, pour donner à l'acier la qualité à chaud indispensable pour qu'on puisse le forger ou le laminer dans de bonnes conditions.

Nous avons eu déjà, en étudiant les aciers au nickel fortement carburés, l'occasion de signaler des modifications des propriétés physiques et mécaniques de ces aciers, produites par le manganèse associé au carbone. Nous avons alors attribué au carbone une influence tout à fait prépondérante, tout en reconnaissant que celle du manganèse n'est pas négligeable. En vue de mettre en évidence cette dernière influence, Imphy a préparé quelques échantillons peu carburés et fortement manganésés, qui ont été étudiés comme les aciers au nickel chromés, au point de vue de la transformation allotropique et au point de vue des propriétés mécaniques.

État allotropique. — *Position des points de transformation allotropique.* — Les résultats des déterminations sont inscrits au tableau XXVIII :

TABLEAU XXVIII.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN		POSITIONS DES POINTS DE TRANSFORMATION			
			avant trempe et écrouissage		après trempe et écrouissage	
	Manganèse	Nickel	à l'échauffement	au refroidissement	à l'échauffement	au refroidissement
(96)	3.88	6.09	725°	255°	715°	280°
(97)	6.42	11.68	590°	15°	280°	610°
(98)	7.14	5.32	non transformé à — 78°.		non transformé à — 78°.	

Digitized by Google

L'échantillon (96) accuse la transformation irréversible comme un acier au nickel proprement dit à 9 p. 100 de nickel pour le point de transformation à l'échauffement, et comme un acier à 13 p. 100 de nickel pour le point de transformation au refroidissement. Or l'influence du carbone est presque négligeable, vu sa teneur très faible, 0,184 p. 100.

L'échantillon (97) accuse la transformation irréversible comme un acier à 20 p. 100 de nickel pour le point de transformation à l'échauffement, et comme un acier à 25 p. 100 de nickel pour le point de transformation au refroidissement. Nous tenons compte de la teneur en carbone, qui est un peu plus élevée que dans l'échantillon précédent, 0,253 p. 100.

L'échantillon (98) se comporte au refroidissement comme les aciers au nickel contenant au moins 29 p. 100 de nickel; mais sa teneur en carbone est un peu élevée: 0,529 p. 100.

Nous en concluons ce qui suit :

Le manganèse, substitué à une partie du nickel, joue un rôle semblable à celui de ce métal au point de vue de l'abaissement du point de transformation; mais, à teneur égale, il produit un abaissement un peu plus grand pour le point de transformation à l'échauffement, et beaucoup plus grand pour le point de transformation au refroidissement. En effet, si on fait, pour chacun des trois échantillons que nous étudions, le total des éléments qui abaissent le point de transformation, à savoir le carbone, le manganèse et le nickel, on obtient respectivement 9,709 p. 100, 18,358 p. 100 et 13,003 p. 100. Ce dernier total abaisse le point de transformation au refroidissement plus que le précédent, parce qu'il comprend 7,148 p. 100 de manganèse contre 6,625 p. 100 dans l'échantillon précédent et 0,529 p. 100 de carbone contre 0,253 p. 100.

Cet abaissement très rapide du point de transformation

Digitized by Google

au refroidissement est la conséquence du grand retard à la transformation allotropique que le manganèse produit par hystérèse, comme le carbone et le nickel ; on voit que le manganèse en produit à teneur égale beaucoup plus que le nickel.

L'hystérèse considérable produite par le manganèse est mise en évidence, tout particulièrement, si on fait intervenir la trempe et l'écrouissage, car, plus grand est le retard de la transformation allotropique, plus grande est l'action de la trempe et de l'écrouissage sur la position du point de transformation au refroidissement, puisque ces deux traitements tendent à détruire l'hystérèse qui s'oppose à la transformation allotropique.

Il convient de signaler que, quoique le total carbone, manganèse et nickel ne soit que de 9.709 p. 100 pour l'échantillon (96) et de 18,358 p. 100 pour l'échantillon (97), la réapparition du magnétisme s'est faite lentement pendant un intervalle de température égal à 80 degrés pour l'échantillon (96) et à 170 degrés pour l'échantillon (97). Ce phénomène de réapparition lente du magnétisme n'a pas été constaté pour les aciers au nickel proprement dits sur des échantillons ayant moins de 22,965 p. 100 pour le total des mêmes éléments. Il semble donc que le manganèse ait, plus que le nickel, tendance à produire ce phénomène de la réapparition lente du magnétisme.

Aciers au manganèse sans nickel. — Pour mettre mieux en évidence le rôle du manganèse, nous avons préparé quelques échantillons d'aciers au manganèse sans nickel, semblables, par conséquent, à ceux que M. R.-A. Hadfield a obtenus, il y a environ quinze ans, et dont il a décrit les propriétés physiques et mécaniques dans plusieurs importantes publications. M. Hadfield a signalé, en particulier, sans pouvoir à cette époque en faire connaître la cause, la propriété d'être non magnétique, qu'il avait constatée comme appartenant aux aciers qui con-

Digitized by Google

tiennent plus de 8 p. 100 de manganèse ; il est maintenant facile d'expliquer ce phénomène de la disparition du magnétisme, conséquence de l'abaissement du point de transformation au refroidissement, qui s'est produit sous l'influence du manganèse.

Nous avons pu obtenir, grâce à l'emploi du manganèse pur, qui est produit maintenant par l'électrométallurgie, des aciers au manganèse moins carburés que ceux qui ont été préparés primitivement (*) par M. Hadfield, en additionnant le manganèse sous forme de ferromanganèse, ce qui nous a permis d'obtenir des aciers magnétiques contenant plus de 8 p. 100 de manganèse.

Nous avons soumis les aciers au manganèse aux mêmes expériences de déterminations de points de transformation que les aciers au nickel ; nous avons obtenu les résultats contenus au tableau XXIX.

TABLEAU XXIX.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN		TRAITEMENTS SUBIS PAR les échantillons	POSITIONS DES POINTS de transformation	
	Carbone	Manganèse		à l'échauffement	au refroidissement
(99)	0.353	3.09	ni trempe ni écrouissage	672°	425°
(100)	0.066	8.29	Id.	660°	175°
(101)	0.295	10.83	trempe	675°	515°
			ni trempe ni écrouissage	non transformé à — 78°	
			trempe sans refroidissement à — 78°	non transformé à + 15°	
			trempe et refroidissement à — 78°	620°	510°
			trempe et écrouissage	655°	560°
(102)	0.137	12.77	ni trempe ni écrouissage	non transformé à — 78°	
			trempe	Id.	
			écrouissage	630°	540°
(103)	0.559	18.44	ni trempe ni écrouissage	non transformé à — 78°	
			trempe	Id.	
			trempe et écrouissage	Id.	

Ce tableau démontre l'abaissement des points de transformation allotropique sous l'influence des additions de

(*) Ultérieurement, M. Hadfield a préparé des aciers au manganèse à faibles teneurs en carbone.

Digitized by Google

manganèse, et l'abaissement très rapide du point de transformation au refroidissement. Il suffit de 10,833 p. 100 de manganèse et 0,29 de carbone pour que le métal soit non magnétique même à — 78°.

Ce tableau met aussi en évidence une propriété remarquable de ces aciers, à savoir la facilité avec laquelle se modifie la position de leurs points de transformation sous l'influence de la trempe et de l'écrouissage, suivis d'un refroidissement. Les relèvements considérables des points de transformation au refroidissement que nous constatons sont la contre-partie des abaissements très considérables de ces mêmes points par retard à la transformation au refroidissement. On voit que le manganèse a au plus haut point la propriété de produire la transformation à grande hystérèse.

Déjà, dans l'échantillon (99), 0,353 p. 100 de carbone et 3,096 p. 100 de manganèse suffisent pour produire un retard à la transformation au refroidissement de 247 degrés.

Avec l'échantillon (100), qui ne contient que des traces de carbone, 0,066 p. 100, et 8,294 p. 100 de manganèse, le retard à la transformation au refroidissement est de 485 degrés.

Mais la trempe seule relève le point de transformation à l'échauffement de cet échantillon de 15 degrés et son point de transformation au refroidissement de 340 degrés. La trempe fait, en outre, apparaître, pour cet acier qui ne contient que 8,360 p. 100, total du carbone et du manganèse, le phénomène de la réapparition lente du magnétisme (*), qui n'a été constaté, pour les aciers au nickel proprement dits, que pour un total minimum de 22,965 p. 100 pour les trois éléments, carbone,

(*) Période employée par l'aiguille aimantée pour se placer à angle droit de la direction du champ terrestre.

Digitized by Google

manganèse et nickel. L'intensité de l'action du manganèse se montre déjà bien nettement.

Avec les teneurs de 10,830 p. 100 de manganèse et 0,295 p. 100 de carbone, échantillon (101), l'abaissement du point de transformation au refroidissement est assez grand pour que la transformation ne puisse pas s'effectuer, même dans la neige carbonique. Mais il suffit de tremper et de refroidir à — 78° pour obtenir la transformation. On remarquera que le refroidissement à — 78° est nécessaire pour produire la transformation une première fois, après quoi elle disparaît à 620° et réapparaît à 510°, avec période d'augmentation d'intensité sous l'influence du refroidissement d'une étendue de 265 degrés, pendant laquelle on a pu suivre l'augmentation de l'intensité du magnétisme. La transformation ne s'est opérée que par l'action du refroidissement, la trempe n'a eu pour effet que de mettre l'acier dans un état moléculaire caractérisé par une position du point de transformation au refroidissement plus élevée que — 78°.

Nous avons déjà constaté exactement le même phénomène dans nos recherches sur les effets de la trempe et de l'écrouissage des aciers au nickel, pour les aciers à 30,44 p. 100 de nickel trempés et écrouis, et pour les aciers à 28,82 p. 100 de nickel trempés (*).

Après trempe et écrouissage, le relèvement des points de transformation est suffisant pour rendre inutile l'intervention de la neige carbonique ; la température ordinaire suffit pour produire le refroidissement nécessaire. En effet, l'échantillon du même métal trempé et non écroui accuse, sous l'action de l'écrouissage seul, un point de transformation à l'échauffement relevé jusqu'à 655°, et un point de transformation au refroidissement relevé jusqu'à 560°. Ce dernier point de transformation est le

(*) Voir page 437.

Digitized by Google

début d'une transformation progressive sous l'influence du refroidissement qui a pu être suivie avec notre installation pendant 430 degrés. L'hystérèse produite par le manganèse devient de plus en plus considérable à mesure que sa teneur augmente.

L'échantillon (102), qui contient 0,137 p. 100 de carbone et 12,772 de manganèse, ne se transforme à — 78° ni avant ni après trempe, mais il se transforme très facilement à la température ordinaire par l'écrouissage seul. A cette teneur, l'hystérèse est telle qu'il suffit de marteler à froid l'acier, sans même le tremper, pour la détruire presque complètement et faire apparaître un magnétisme intense. Le point de transformation à l'échauffement du métal ainsi transformé est à 630°, et le point de transformation au refroidissement à 540°; l'augmentation progressive de l'intensité de la transformation au refroidissement a été constatée jusqu'à 200°, soit pendant 340 degrés. L'écrouissage seul a relevé d'abord le point de transformation d'une température inférieure à — 78° jusqu'à la température ordinaire; après quoi la température ordinaire, agissant à son tour, a relevé ce point de transformation jusqu'à 540°; le retard à la transformation a été ainsi diminué de plus de 600 degrés par l'action de l'écrouissage. On voit que *les résultats constatés avec les aciers au nickel se reproduisent très amplifiés avec les aciers au manganèse.*

L'échantillon (103), qui contient 0,559 p. 100 de carbone et 18,40 p. 100 de manganèse, ne s'est pas transformé dans l'air liquide à — 188°, aussi bien après qu'avant trempe et écrouissage; la teneur en manganèse est trop élevée.

Propriétés mécaniques des aciers au nickel manganésés. — *Essais à la traction.* — Nous avons essayé à la trac-

Digitized by Google

tion les aciers (96) et (97); les résultats obtenus sont inscrits au tableau XXX:

TABLEAU XXX.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN Manganèse	TENEURS EN Nickel	TRAITEMENTS subis par les échantillons	RÉSULTATS DES ESSAIS DE TRACTION Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements à la rupture p. 100	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
				kil.	kil.		
(96)	3.388	6.04	non trempé..	?	112	1	»
			trempé.....	?	110	1	»
			recuit à 400°.	101,9	114,3	1	2
(97)	6.425	11.68	non trempé..	42,7	75,7	25	23
			trempé.....	29,9	62,7	26,7	28

L'échantillon (96), qui a subi la transformation irréversible, est du type à haute résistance; c'est un métal sec, même après recuit à 400°.

L'échantillon (97), qui n'est pas magnétique, est du type métal à grand allongement à la rupture; il s'adoucit notablement par la trempe.

Ces deux exemples suffisent à montrer que l'addition d'une forte proportion de manganèse ne modifie pas l'allure générale des phénomènes constatés jusqu'ici; l'influence de la position du point de transformation sur les propriétés mécaniques reste prépondérante.

Propriétés mécaniques des aciers au manganèse sans nickel. — Les propriétés mécaniques des aciers au manganèse ont fait l'objet d'études approfondies de M. R.-A. Hadfield; il a préparé de très nombreuses coulées de ces aciers; il en a fait et il continue à en faire des applications. Nous avons eu l'occasion, en 1887, de recevoir de M. Hadfield lui-même de nombreuses et très intéressantes explications, et de voir de nombreux échantillons à Sheffield, où nous nous étions rendu, attiré par le bruit consi-

Digitized by Google

dérable que faisait l'annonce des propriétés de ces métaux, propriétés très extraordinaires à cette époque.

Essais à la traction. — Nous donnerons les résultats des essais à la traction auxquels nous avons soumis les échantillons dont nous avons donné la nomenclature, quoique ces résultats soient loin de représenter ce qui peut être obtenu de meilleur avec les aciers au manganèse. Pour s'en rendre compte, il suffit de prendre connaissance des mémoires de M. Hadfield (*).

TABLEAU XXXI.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN Carbone	TENEURS EN Manganèse	TRAITEMENTS subis par les échantillons	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION — Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
				kil.	kil.		
(99)	0.35	3 09	ni trempe ni recuit..	?	130,2	1,0	»
			recuit à 450°.....	113,2	122,0	9,5	37
(100)	0.06	8.29	trempe à 450°.....	82,3	119,2	11,5	25
			recuit à 400°.....	93,7	125,0	13,5	43
(101)	0.29	10.83	ni trempe ni recuit..	»	49,5	2	»
			trempe à 800°.....	»	42,8	0,5	»
			trempe et recuit à 400°	»	82,9	4	»
(103)	0.55	18.46	non trempé (*).....	48,5	104,5	36,5	»
			trempé à 900°.....	32,5	98,5	68,0	62

(*) Éprouvette rompue hors repères.

Ces résultats peu nombreux suffisent pour confirmer ce que nous venons de dire de l'influence prépondérante de la position du point de transformation.

L'échantillon (100), très magnétique, c'est-à-dire ayant subi bien nettement la transformation irréversible, est un acier à haute limite d'élasticité et haute résistance, qui s'adoucit par un recuit à basse température, comme les aciers au nickel irréversible. Cet acier, très remarquable,

(*) *Manganese Steel*, par R.-A. HADFIELD, London, 1888.

Digitized by Google

donne à la traction, après recuit à 400°, presque exactement les mêmes résultats que l'acier (36) à 20,52 p. 100 de nickel.

Nous ferons remarquer que cet adoucissement par un recuit à 400°, qui a été découvert à Imphy pour les aciers au nickel (*), a été signalé pour les aciers au manganèse longtemps auparavant par M. Hadfield (**).

L'échantillon (103), non magnétique, même dans l'air liquide, est semblable aux aciers au nickel non magnétiques. Il en a la limite d'élasticité peu élevée et le grand allongement à la rupture; il s'adoucit de même par trempe.

L'échantillon (101), dont le point de transformation est voisin de la température ordinaire, est un métal très sec. La position de son point de transformation au-dessous de la température ordinaire, peu éloigné, est peut-être la cause de cette mauvaise qualité; c'est cependant à vérifier; il serait imprudent de tirer cette conclusion des résultats d'un seul échantillon.

L'échantillon (99), quoique plus sec que l'échantillon (100), est cependant remarquable comme acier du type à haute limite d'élasticité.

Essais de choc. — Les échantillons (100) et (103), très remarquables à l'essai à la traction, ont été essayés par M. Frémont au choc sur barrettes entaillées; les résultats obtenus sont les suivants :

TABLEAU XXXII.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS en manganèse	TRAITEMENTS SUBIS par les échantillons	RÉSULTATS des essais de choc sur barrettes entaillées de 8 × 10 × 30 mm.
			kilogrammètres
(100)	8.29	recuit à 400°.....	5
(103)	18.46	non trempé.....	23
		trempé.....	29

(*) *Annales des Mines*, t. XIV, p. 315, septembre 1898.
(**) *Manganese Steel*, London, 1888, p. 13.

Digitized by Google

L'acier qui a subi la transformation irréversible est assez fragile, mais l'acier qui ne l'a pas subie est très peu fragile.

Ces résultats sont semblables à ceux que donnent les aciers au nickel aux mêmes états allotropiques ; le dernier n'est guère conforme à la réputation de fragilité du manganèse. Cependant la texture est à grain fin et non à arrachements comme celle des aciers au nickel.

TROISIÈME PARTIE.

CONCLUSIONS RELATIVES A LA TRANSFORMATION IRRÉVERSIBLE.

Résumant les constatations que nous venons de faire successivement au sujet de la transformation irréversible, sur des échantillons d'aciers choisis de manière à mettre en évidence l'action de chacun des éléments que nous avons mis à l'étude nous arrivons aux conclusions suivantes :

1° Les points de transformation irréversible des aciers s'abaissent progressivement à mesure qu'augmente la teneur de l'un des quatre éléments : carbone, manganèse, nickel et chrome ;

2° Le point de transformation au refroidissement s'abaisse généralement plus vite que le point de transformation à l'échauffement, en conséquence du retard à la transformation allotropique dû à l'hystérèse produite par la présence de ces quatre éléments. La trempe et l'écrouissage, et aussi, dans certaines conditions, le recuit, tendent à annuler cette hystérèse, c'est-à-dire à détruire le faux équilibre moléculaire qui s'est produit, phénomène analogue à la surfusion ou la sursaturation ;

3° L'importance du retard à la transformation allotro-

Digitized by Google

pique, c'est-à-dire de l'écart entre les points de transformation à l'échauffement et au refroidissement, est d'autant plus grande que la proportion de certains éléments, parmi ceux qui produisent l'abaissement des points de transformation irréversible, est plus grande;

4° L'abaissement du point de transformation à l'échauffement se fait plus ou moins rapidement sous l'influence de ces divers éléments ; le plus actif est le carbone, les autres se rangent à ce point de vue dans l'ordre suivant : manganèse, nickel, chrome. L'ordre est le même pour la rapidité avec laquelle l'abaissement du point de transformation au refroidissement se produit; mais le retard à la transformation allotropique étant beaucoup plus grand avec les premiers de ces éléments qu'avec les derniers, il en résulte qu'il suffit d'environ 1,5 p. 100 de carbone pour produire le même abaissement du point de transformation au refroidissement qu'environ 10 p. 100 de manganèse ou environ 30 p. 100 de nickel, et que pareil abaissement du point de transformation au refroidissement ne peut pas être obtenu avec le chrome;

5° Quel que soit l'élément qui a produit l'abaissement du point de transformation irréversible au refroidissement, on constate que, tant que ce point de transformation se maintient au-dessus de la température ordinaire, l'acier est du type à haute limite d'élasticité et haute résistance, et qu'il est du type à basse limite d'élasticité et grand allongement lorsque, la teneur de cet élément ayant augmenté, le point de transformation est abaissé au-dessous de la température ordinaire;

6° Au point de vue de l'abaissement du point de transformation et, sauf exceptions, au point de vue des propriétés mécaniques, ces divers éléments peuvent se substituer l'un à l'autre, leurs actions se superposant sans se restreindre mutuellement.

Le diagramme (*fig.* 11) résume nos constatations rela-

Digitized by Google

tives à la transformation irréversible ou à *grande hystérèse* en présence des trois éléments, manganèse, nickel et chrome. On remarquera que les courbes à l'échauffe-

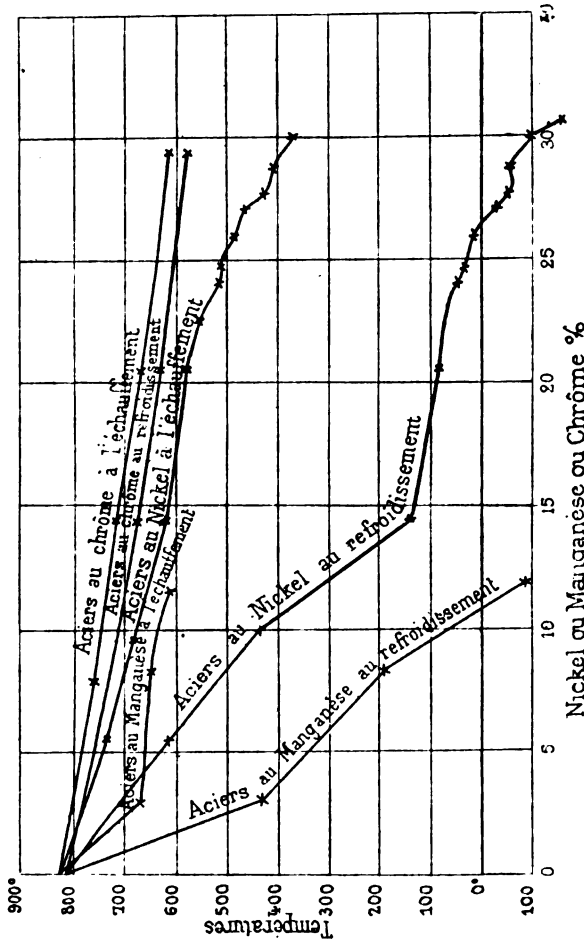


FIG. 11. — Diagramme des positions des points de transformation allotropique irréversible des aciers au manganèse, au nickel et au chrome.

ment restent voisines; il n'en est pas de même des courbes au refroidissement, dont la position dépend surtout de l'intensité de l'hystérèse. Ce diagramme n'a pas

Digitized by Google

pu résumer nos constatations relatives à l'action du carbone, qui n'agit nettement que lorsqu'il est associé au manganèse, au nickel ou au chrome.

QUATRIÈME PARTIE.

ACIERS ET ALLIAGES A TRÈS HAUTES TENEURS EN NICKEL, CHROME ET MANGANÈSE.

Influence du nickel, du carbone, du chrome, du manganèse et du fer sur la transformation réversible. — Il n'a guère été question de la transformation réversible que pour démontrer qu'elle n'est pas régie par les mêmes lois que la transformation irréversible, et que ces deux transformations se produisent en pleine indépendance l'une à côté de l'autre. Nous allons donner connaissance de quelques faits qui sont de nature à préciser les conditions dans lesquelles se produit la transformation réversible.

Nous constaterons tout d'abord que la transformation réversible n'apparaît que dans les aciers contenant au moins 23 p. 100 de nickel. Les aciers au manganèse et les aciers au nickel carburés et chromés, contenant moins de 23 p. 100 de nickel, sont magnétiques par la transformation irréversible, ou restent non magnétiques, même lorsqu'ils sont refroidis dans l'air liquide.

Les points de transformation réversible à l'échauffement et au refroidissement, qui ne sont éloignés sur l'échelle des températures que de quelques degrés, se relèvent tous deux, à mesure que la teneur en nickel augmente à partir de 23 p. 100, teneur pour laquelle les positions de leurs points de transformation sont voisines de — 150°. M. Osmond a constaté que, lorsque le fer et le nickel sont seuls en présence, la position de ces points de transformation passe par un maximum, 590° et 560°, vers 70 p. 100 de nickel, après quoi, elle se rapproche de la position du point de transformation du nickel

Digitized by Google

pur, 340°. Nous avons cherché à modifier la position de ces points de transformation, comme nous l'avons fait pour les points de transformation irréversible, en additionnant du carbone, du chrome et du manganèse, et en faisant subir à l'acier la trempe et l'écrouissage. Ces divers moyens n'agissent nullement sur les points de transformation réversible de la même manière que sur les points de transformation irréversible.

Nous ferons observer que toute addition faite en proportion très considérable a une action notable comme modifiant les proportions du fer et du nickel, et que cette action doit être considérée, pour une teneur en nickel donnée, comme équivalente à une augmentation de la teneur en nickel, c'est-à-dire comme produisant un relèvement des points de transformation.

Nous avons cherché à abaisser les points de transformation réversible des aciers au nickel de teneurs diverses en introduisant des quantités variées de carbone, chrome et manganèse, comme nous l'avons fait pour les points de transformation irréversible. Nous avons ainsi constitué une série d'aciers ou alliages intéressants par la position de leurs points de transformation réversible, composée comme suit :

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN		
	Carbone	Chrome	Nickel
(68)	1.50	5.42	28.16
(69)	0.12	5.93	28.28
(72)	0.67	14.63	29.30
(74)	0.20	1.90	29.88
(75)	1.69	1.52	29.92
(78)	0.74	2.57	31.30
(79)	0.04	5.47	34.48
(82)	0.43	2.55	42.16
(85)	0.16	9.04	49.92
(86)	0.82	21.43	54.80
(87)	0.13	14.20	72.13
(88)	0.32	3.69	84.00
(89)	0.40	2.70	84.70

Digitized by Google

Les deux premiers échantillons de cette série ont à peu près la même composition chimique, sauf au point de vue du carbone, dont la teneur est de 1,509 p. 100 pour l'échantillon (68) et de 0,129 p. 100 pour l'échantillon (69). Le premier est très magnétique à la température ordinaire, et le second seulement légèrement magnétique; nous devons en conclure que le carbone, en présence du chrome, relève les points de transformation allotropique réversible. On remarquera que l'augmentation de la teneur en carbone équivaut à une augmentation de la proportion du nickel par rapport au fer.

L'échantillon (72), modérément carburé et très fortement chromé, n'est que légèrement magnétique à la température ordinaire, tandis que l'échantillon (75), très carburé et peu chromé, est très magnétique.

L'échantillon (74), de même teneur en nickel que les deux précédents, peu chromé et peu carburé, est très magnétique. Nous devons en conclure que la présence du chrome, en forte proportion, tend à abaisser les points de transformation réversible.

Les échantillons (79) à (85) sont tous très magnétiques à la température ordinaire; cependant l'échantillon (85) contient 9,042 de chrome, et l'échantillon (79) n'en contient que 5,478, et seule la teneur en carbone de l'échantillon (79) est un peu élevée : 0,745 p. 100.

L'échantillon (86) est non magnétique. L'abaissement, jusqu'à une température inférieure à la température ordinaire, des points de transformation a été réalisé par l'addition de 21,430 p. 100 de chrome. La teneur en fer est de 22,24 p. 100. Le nickel et le fer sont l'un par rapport à l'autre dans les proportions 71,1 et 28,8 p. 100, ce qui correspond à 550° pour les positions des points de transformation.

L'abaissement du point de transformation au-dessous de —78° a été obtenu pour l'échantillon (87), qui contient

Digitized by Google

72,13 p. 100 de nickel et 11,91 p. 100 de fer, soit p. 100 de nickel et de fer exclusivement 85,8 et 14,1, pour une teneur en chrome de 14,209 p. 100. La position des points de transformation qui correspond à cette teneur en nickel est 500° environ. Il apparaît donc que l'abaissement du point de transformation s'obtient plus facilement à mesure que la teneur en nickel augmente, c'est-à-dire que la teneur en fer diminue.

Les échantillons (88) et (89) sont très magnétiques; les teneurs en chrome, 3,696 p. 100 et 2,706 p. 100, sont trop faibles pour abaisser jusqu'à la température ordinaire les points de transformation, qui, pour les teneurs de 84 p. 100 de nickel et 10 p. 100 de fer, sont voisins de 500°.

Propriétés mécaniques de quelques aciers ou alliages à très hautes teneurs en nickel et chrome. — Nous donnons ci-après (tableau XXXIII) les résultats des essais à la traction auxquels ont été soumis quelques-uns des échantillons que nous venons d'examiner au point de vue de leur état magnétique.

TABLEAU XXXIII.

TENEURS EN			DÉSIGNATION des échantillons	TRAITEMENTS subis par les échantillons	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
Carbone	Chrome	Nickel			Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
					kil.	kil.		
1.50	5.42	28.16	(68)	non trempé..	52,7	86,5	5,0	6
				trempé.....	39,3	73,1	3,5	7
0.12	5.93	28.28	(69)	non trempé..	41,3	62,1	25,0	52
				trempé.....	23,2.	52,4	45,0	64
0.20	1.90	29.88	(74)	non trempé..	?	59,4	29,0	57
				trempé.....	23,9	50,6	42,5	66
0.74	2.57	31.30	(78)	non trempé..	46,9	63,4	31,5	52
				trempé.....	23,7	52,8	38,0	62
0.04	5.47	34.48	(79)	non trempé..	69,6	96,2	21,0	21
				trempé.....	48,9	86,4	37,5	55
0.43	2.55	42.16	(82)	non trempé..	77,5	95,8	28,0	43
				trempé.....	36,8	77,2	42,5	54

Digitized by Google

La forte teneur en carbone de l'échantillon (68) est nettement nuisible au point de vue de la qualité, car l'échantillon (69), qui n'en diffère que par la teneur en carbone, est un excellent acier. L'acier fortement carburé est sec.

On remarquera la bonne qualité de l'échantillon (79), qui contient 5,478 p. 100 de chrome avec 0,048 p. 100 de carbone. On peut en conclure que le chrome, même en forte proportion, exerce une influence favorable sur les propriétés mécaniques des aciers à hautes teneurs en nickel.

Les résultats des échantillons (78) et (82) confirment cette constatation.

Alliages nickel-chrome. — Nous avons obtenu, en continuant à augmenter la proportion du nickel, des aciers au nickel ne contenant plus que de très petites proportions de fer qui doivent être plutôt dénommés : nickels chromés, ou *alliages nickel-chrome*.

Les déterminations des positions des points de transformation de ces alliages ont donné les résultats qui suivent :

TABLEAU XXXIV.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN			POSITIONS DES POINTS DE TRANSFORMATION	
	Chrome	Nickel	Fer	à l'échauffement	au refroidissement
(104)	2.673	91.20	1.35	225°	210°
(105)	4.323	91.80	1.18	125°	105°
(106)	9.400	86.06	1.75	vers — 150°	
(107)	9.624	85.95	1.44	id.	
(108)	9.871	87.35	1.65	id.	
(109)	9.930	85.91	1.89	id.	

Ces résultats mettent bien en évidence l'abaissement du point de transformation à mesure que la teneur en chrome augmente.

Digitized by Google

Ils montrent aussi que l'influence de la teneur en carbone sur la position du point de transformation est sensiblement nulle, car le magnétisme apparaît dans les mêmes conditions, à l'immersion dans l'air liquide, pour les 4 échantillons qui contiennent de 9 à 10 p. 100 de chrome, quoique leurs teneurs en carbone varient de 0,110 à 0,965 p. 100.

L'alliage nickel-chrome (106) est intéressant au point de vue métallurgique ; M. Ch.-Ed. Guillaume propose de l'employer pour certains appareils de précision. Il est assez dur, résistant, prend un beau poli, est peu oxydable et non magnétique, ce qui le fera préférer au nickel pur pour bien des usages, notamment pour la fabrication des poids de précision.

Il donne aux essais à la traction les résultats suivants :

TABLEAU XXXV.

TRAITEMENTS subis par les échantillons	LIMITES d'élasticité par mm. carré	RÉSISTANCES à la rupture par mm. carré	ALLONGEMENTS p. 100 à la rupture	STRICTIONS $\frac{S-s}{S} \times 100$
	kil.	kil.		
Non trempé.....	57,2	82,5	27	35
Trempé.....	36,8	76,6	28	32

M. Frémont a obtenu avec l'échantillon (105 *bis*), à 87,23 p. 100 de nickel et 6,81 p. 100 de chrome, à l'essai de choc sur barrette entaillée : 34 kilogrammètres, résultat qui accuse une résistance au choc exceptionnelle.

L'alliage nickel-chrome se comporte comme les aciers au nickel n'ayant pas subi la transformation irréversible ; il est du type à faible limite d'élasticité et grand allongement, qui s'adoucit par la trempe. Cette constatation confirme l'analogie très grande des aciers au nickel,

Digitized by Google

n'ayant pas subi la transformation irréversible, avec le nickel pur, ou du moins les alliages à base de nickel ne contenant pas de fer.

Alliages nickel-manganèse. — Il restait à rechercher l'influence du manganèse sur la position du point de transformation des alliages à base de nickel ne contenant plus le fer qu'en très petites proportions, alliages qui doivent être dénommés : nickels manganésés, ou *alliages nickel-manganèse*.

Imphy a préparé quelques alliages de nickel-manganèse, de teneurs en manganèse croissantes, pour permettre de suivre le mouvement des points de transformation, conséquent des variations de la teneur en manganèse.

Les positions de leurs points de transformation sont les suivantes :

TABLEAU XXXVI.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS EN		POSITION DES POINTS de transformation	
	Manganèse	Nickel	à l'échauffement	au refroidissement
(110)	0.46	98.00	350°	325°
(111)	3.73	92.30	275°	265°
(112)	8.85	89.72	250°	230°
(113)	13.55	85.40	153°	145°

L'abaissement du point de transformation se produit bien nettement sous l'influence du manganèse, mais il est beaucoup moins rapide qu'avec le chrome.

Imphy n'a pas pu obtenir des alliages nickel-manganèse à teneurs en manganèse plus élevées que 13,5 p. 100 ; il semble que la solubilité du manganèse dans le nickel soit à sa limite aux environs de cette teneur. Un alliage à 20 p. 100 de nickel, qu'il a tenté d'obtenir, ne se forge

Digitized by Google

pas, et n'accuse plus un abaissement du point de transformation suivant la même loi; ce sont des symptômes de non-homogénéité.

L'échantillon (111) a donné, aux essais à la traction, les résultats qui suivent :

TABLEAU XXXVII.

TRAITEMENTS subis par les échantillons	LIMITES d'élasticité par mm. carré	RÉSISTANCES à la rupture par mm. carré	ALLONGEMENTS p. 100 à la rupture	STRICTIONS $\frac{S-s}{S} \times 100$
	kil.	kil.		
Non trempé.....	28.7	62,0	38,5	52
Trempé	24,9	61,1	36,0	46

Les propriétés mécaniques sont analogues à celles des alliages nickel-chrome, ou des aciers au nickel n'ayant pas subi la transformation irréversible.

Alliages nickel-fer. — Les aciers au nickel à très hautes teneurs en nickel étant considérés comme du nickel auquel a été additionné du fer, ce qui a été constaté au sujet de la position de leurs points de transformation peut être exposé sous la forme suivante : les points de transformation réversible s'élèvent, à mesure que la proportion de fer augmente, jusqu'à ce que cette proportion atteigne environ 30 p. 100, après quoi ces points de transformation s'abaissent.

Ils suivent donc d'abord une loi particulière, mais n'en finissent pas moins par suivre la loi constatée pour les additions de chrome et de manganèse, puisqu'ils s'abaissent à mesure que la teneur en fer augmente lorsque la teneur en fer dépasse 30 p. 100.

Les alliages nickel-chrome et nickel-manganèse subissent la transformation réversible dans les mêmes conditions que les aciers au nickel réversible.

Le diagramme (*fig.* 12) résume nos constatations rela-

Digitized by Google

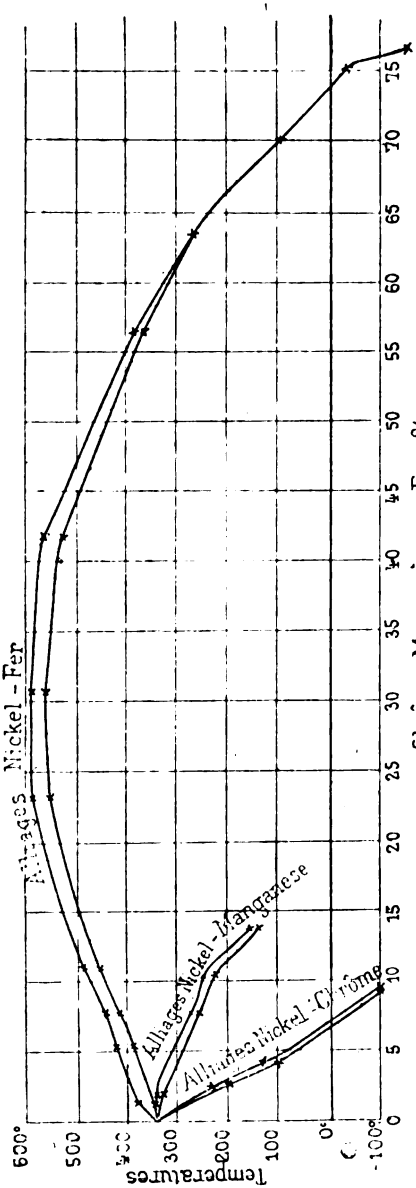


FIG. 12. — Diagramme des positions des points de transformation allotropique réversible des alliages : nickel-chrome, nickel-manganèse et nickel-fer.

Digitized by Google

tives aux alliages nickel-chrome, nickel-manganèse et nickel-fer (*).

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE QUELQUES ACIERS AU COBALT.

Rôle du cobalt. — Les métaux magnétiques sont les seuls qui subissent des transformations allotropiques semblables à celles des aciers au nickel, et les seuls qui donnent à leurs alliages la propriété d'en subir. Il a été utile de comparer les lois suivant lesquelles s'opèrent les transformations allotropiques des aciers ou alliages contenant du fer ou du nickel, deux des métaux magnétiques ; une étude parallèle des aciers ou alliages contenant du cobalt, le troisième métal magnétique, apporterait très probablement des lumières nouvelles. Nous n'avons pas entrepris cette étude, mais nous avons préparé et étudié sommairement quelques échantillons d'aciers au cobalt, dans les mêmes conditions que les aciers au nickel, ce qui nous a permis de réunir quelques indications utilisables au moins comme première orientation.

Les compositions chimiques de ces échantillons sont les suivantes :

TABLEAU XXXVIII.

DÉSIGNATION des échantillons	COMPOSITION CHIMIQUE P. 100					
	Carbone	Silicium	Phosphore	Soufre	Manganèse	Cobalt
(114)	0.250	0.117	0.024	0.015	0.176	5.12
(115)	0.267	0.232	0.018	0.033	0.364	10.80
(116)	0.287	0.228	0.018	0.033	0.377	15.40
(117)	0.160	0.117	0.024	0.031	0.180	19.76
(118)	0.183	0.140	0.007	0.023	0.393	25.16
(119)	0.427	0.117	0.006	0.025	0.223	29.24

(*) Une communication récente de M. Bruce Hill (*Verhandl. der Deutschen Physikal. Gesellsch.*, IVe Jahrg, Nr 9) fait connaître la position des points de transformation magnétique des alliages nickel-cuivre et nickel-étain. Le cuivre et l'étain abaissent les points de transformation comme le chrome et le manganèse. La transformation est de même réversible.

Digitized by Google

État allotropique. — Les positions des points de transformation allotropique de ces aciers ont été déterminées au four chauffé électriquement. Les résultats obtenus sont les suivants :

TABLEAU XXXIX.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS en cobalt	POSITIONS DES POINTS DE TRANSFORMATION	
		à l'échauffement	au refroidissement
(114)	5.12	810°	795°
(115)	10.80	860°	830°
(116)	15.40	910°	885°
(117)	19.76	925°	900°
(118)	25.16	935°	910°
(119)	29.24	1050°	1040°

L'augmentation de la teneur en cobalt produit un relèvement des points de transformation qui, à 29,24 p. 100 de cobalt, sont très voisins du point de transformation du cobalt pur, 1.100°. Ces résultats établissent très probablement que, jusqu'à la teneur de 30 p. 100, le cobalt relève les points de transformation du fer.

Mais ce relèvement continue-t-il à se produire au delà de 30 p. 100, ou passe-t-il bientôt par un maximum pour se changer ensuite en abaissement, comme c'est le cas pour les alliages nickel-fer ? Des recherches nouvelles sont nécessaires pour le faire connaître.

Jusqu'à 30 p. 100 de cobalt, la transformation allotropique se fait avec très peu d'hystérèse, comme celle des aciers au chrome.

Propriétés mécaniques. — L'étude des propriétés mécaniques de ces aciers fournit des renseignements importants sur leur état allotropique en même temps que sur leur valeur au point de vue mécanique. Ils ont été essayés avant et après trempe ou recuit.

Les essais à la traction avant trempe et recuit ont donné les résultats suivants :

Digitized by Google

TABLEAU XL.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS en cobalt	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
		Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
		kil.	kil.		
(114)	5.12	33,5	46,7	32	68
(115)	10.80	44,1	60,6	27,5	53
(116)	15.40	49,7	66,7	25,5	55
(117)	19.76	59,8	73,8	18,5	42
(118)	25.16	56,3	74,2	18,5	39
(119)	29.24	54,9	76,8	18	34

L'augmentation progressive de la teneur en cobalt produit un relèvement bien progressif de la limite d'élasticité et de la résistance à la rupture, avec diminution de l'allongement à la rupture et de la striction. Par conséquent, les additions de cobalt agissent dans le même sens que les additions de nickel, quoique avec moins d'intensité ; c'est peut-être ce qui explique pourquoi, jusqu'à la teneur de 30 p. 100, elles ne cessent pas d'avoir la même action durcissante; on sait qu'il n'en est pas de même avec le nickel.

Ces aciers ont tous des propriétés mécaniques semblables à celles des aciers au nickel qui ont subi la transformation irréversible. La transformation allotropique, qui s'accuse par un adoucissement de l'acier vers la teneur de 27 p. 100 lorsqu'on fait des additions de nickel, ne s'accuse nullement de la même manière aux teneurs inférieures ou égales à 29,24 p. 100 de cobalt, même lorsque la teneur en carbone est élevée.

L'influence du recuit à haute ou basse température, et de la trempe à 900°, a été essayée sur quelques-uns de ces aciers, notamment sur les plus durs.

Digitized by Google

TABLEAU XLI.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS en cobalt	TRAITEMENTS subis par les échantillons	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
			Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
			kil.	kil.		
(118)	25.16	recuit à 900°..	62,4	79,8	16,2	56
(119)	29.24	recuit à 900°..	?	43,5	0	»
		recuit à 400°..	59,8	71,9	3	»
(114)	5.12	trempé à 900°.	42,3	59,2	18	69
(115)	10.80	Id.	49,8	72,2	17,5	61
(116)	15.40	Id.	52,5	70,8	18,5	58
(117)	19.76	Id.	60,6	77	18,5	57
(118)	25.16	Id.	62,5	80,1	16,2	50
(119)	29.24	Id.	53,5	64,2	3,5	»

Ces résultats, comparés à ceux du tableau XL, montrent que, comme les aciers au nickel ayant subi la transformation irréversible, les aciers au cobalt, de teneurs inférieures à 30 p. 100, durcissent considérablement par le recuit à 900°, qu'il soit ou non suivi de la trempe. Aucun de ces aciers ne s'adoucit par la trempe.

Ces résultats établissent que, au moins au début, l'état allotropique des aciers au cobalt se modifie, sous l'influence des additions de cobalt, à peu près dans les mêmes conditions que celui des aciers au nickel sous l'influence des additions de nickel. Cependant les points de transformation s'élèvent au lieu de s'abaisser, et la transformation se produit avec très peu d'hystérèse.

Mais ces résultats ne font pas connaître s'il existe une teneur en cobalt à partir de laquelle se manifeste un état allotropique analogue à celui des aciers au nickel qui n'ont pas subi la transformation irréversible ; la teneur en cobalt de notre série ne s'élève pas assez pour fournir une indication à ce sujet.

Au point de vue mécanique, le cobalt semble avoir une action très favorable, comme le nickel.

Digitized by Google

VUES THÉORIQUES.

Avant-propos. — Nous nous sommes abstenu jusqu'ici de relier par des hypothèses et une théorie les faits que nous avons eu à exposer ; nos recherches n'en ont pas moins été entreprises et poursuivies avec des vues théoriques et des interprétations qui ont considérablement facilité notre tâche. Il convient de les faire connaître, car elles ont été notre guide pour l'exposé des constatations aussi bien que pour la direction des recherches.

Elles se sont inspirées d'importants travaux antérieurs ; nous en citerons quelques-uns dont l'étude nous a été particulièrement profitable.

Les théories de M. Osmond se sont montrées non seulement parfaitement d'accord avec tous les phénomènes connus que nous avons eu l'occasion de reproduire, mais encore merveilleusement préparées pour s'adapter aux phénomènes que nos recherches ont mis pour la première fois en évidence. Aussi avons-nous suivi résolument la voie ouverte par M. Osmond et l'école allotropiste, en donnant dans nos recherches la première place aux transformations allotropiques.

C'est à un contact presque permanent avec M. Ch.-Ed. Guillaume que nous devons d'avoir eu l'attention attirée sur de très remarquables propriétés physiques des aciers au nickel, étudiées par ce savant au Bureau international des Poids et Mesures, propriétés qui sont parmi les plus importantes manifestations des transformations allotropiques.

Nous avons aussi tiré grand profit des travaux de M. le professeur Tschernoff, dont les premières publications, qui datent de 1868, ont fait un des initiateurs des études d'allotropie ; et de ceux de M. Pourcel, qui, aux usines de Terrenoire, obtenait, vers la même époque,

Digitized by Google

des aciers moulés de qualités équivalentes à celle des aciers forgés, au moyen de trempes et de recuits. Nous devons, en outre, signaler comme travaux de la plus grande importance ceux de M. H. Le Chatelier, de M. et Mme Curie, de sir W. Roberts Austen, de M. le professeur Howe et de M. R.-A. Hadfield, en donnant une mention spéciale à ceux de ce dernier savant; ses mémoires sur les aciers au manganèse et sur les aciers au nickel contiennent une quantité vraiment énorme de documents. Il convient de rappeler que les mémoires de M. R.-A. Hadfield sur les aciers au manganèse sont les premières publications qui aient été faites sur les aciers à hautes teneurs en éléments autres que le fer.

Transformations allotropiques du fer. — Théorie de M. Osmond. — Le point de départ de la théorie de M. Osmond est la constatation des dégagements de chaleur qui se produisent pendant le refroidissement du fer.

Le fer électrolytique, fer très pur, accuse, d'après M. Osmond, un dégagement de chaleur brusque à 855°, et un second un peu progressif entre 740 et 700°. M. Osmond a dénommé ces températures *points critiques* ou *points de transformation;* il les désigne par les lettres a_3 et a_2, et désigne par les lettres α, β, γ, les trois états allotropiques du fer correspondant aux trois zones de tem pératures ainsi définies. Le fer α est magnétique, les fers β et γ sont non magnétiques (*).

(*) Il résulte des travaux de M. Curie que les fers β et γ ne sont pas exactement non magnétiques. Ils n'accusent plus le *ferromagnétisme;* mais le fer est alors *faiblement magnétique*, comme l'oxygène, le palladium et un grand nombre d'autres corps (Voir la thèse de M. Curie : *Propriétés magnétiques des corps à diverses températures*, mars 1895). Le fer suit, à cet état, la loi générale découverte par M. Curie, qui est ainsi conçue : le coefficient d'aimantation des corps faiblement magnétiques varie en raison inverse de la température absolue; il est indépendant de l'intensité du champ.

Le passage du fer de l'état faiblement magnétique, β et γ, à l'état

Digitized by Google

La présence de certains corps étrangers modifie la position de ces points de transformation sur l'échelle des températures, soit en les abaissant, soit en les relevant. M. Osmond a constaté qu'une addition de nickel, augmentant progressivement, abaisse les deux points a_3 et a_2, et les rapproche tellement qu'on ne distingue plus guère qu'un seul point, lorsque la teneur en nickel dépasse 10 p. 100. Au-delà de cette teneur, le point unique de transformation, qui comprend le point de transformation magnétique, continue à s'abaisser; lorsqu'il est au-dessous de la température ordinaire, l'alliage ne contient plus de fer sous la forme magnétique; le fer qu'il contient est à l'état γ, ou γ mélangé de β. Le même phénomène est constaté lorsque des additions de manganèse sont faites dans les mêmes conditions que les additions de nickel; on obtient des alliages de fer et de manganèse qui contiennent, à la température ordinaire, du fer γ.

Entre le fer γ pur et le fer α, correspondant à la transformation complète, se place la zone des états correspondants à des transformations incomplètes avec maintien, à la température ordinaire, d'une proportion plus ou moins grande de fers β ou γ. De là la série des aciers durs et magnétipolaires.

Le dégagement de chaleur qui accuse la position du point de transformation allotropique s'étend sur une zone de plus en plus grande, et devient de plus en plus difficile à constater, à mesure que la teneur en nickel ou en manganèse s'élève; mais la position du point a_2 s'accuse toujours très nettement par l'apparition du magnétisme.

---

ferromagnétique α, se fait progressivement. M. Curie a fait remarquer que l'intensité de l'aimantation du fer augmente sous l'influence de la température et de l'intensité du champ, comme la densité d'un fluide sous l'influence de la température et de la pression.

Cette dernière question a aussi été traitée par M. Osmond dans un mémoire intitulé : *What is the inferior limit of the critical point a_2?* (*The Metallographist*, july 1899; Boston, Mass., U. S. A.).

Digitized by Google

Telle est, très brièvement résumée, la théorie de M. Osmond et de l'école allotropiste.

État de dissolution mutuelle. — Les aciers qui ont fait l'objet de nos recherches doivent être considérés comme contenant leurs divers éléments à l'état de *dissolution mutuelle*, ou encore comme constituant des *solutions solides*, termes adoptés par plusieurs auteurs.

L'état de dissolution (*) est un état autre que la combinaison chimique proprement dite, laquelle fait disparaître tous les caractères distinctifs des constituants, et s'effectue toujours suivant des proportions définies. C'est aussi un état autre que le simple mélange, quelque intime qu'il soit, tel, par exemple, que celui des gaz qui composent l'air atmosphérique. En effet, quoique conservant la plus grande partie de leurs caractères distinctifs, et étant associés en proportions quelconques, ce qui exclut la combinaison chimique, ces divers éléments subissent cependant des actions mutuelles, qui s'accusent par des modifications considérables de leurs propriétés, ce qui ne se produirait pas s'il y avait simple mélange.

Dans les aciers, le rôle principal est généralement joué par le fer, parce qu'il est de beaucoup le corps dont la proportion est la plus considérable. Sa personnalité, s'il est permis de s'exprimer ainsi, reste parfaitement distincte, quoique les corps qui lui sont adjoints, parfois en grand nombre et en fortes proportions, tendent à modifier profondément ses propriétés physiques et mécaniques. Il conserve notamment sa propriété de subir des transformations allotropiques. Les autres corps gardent de même

(*) Voir le mémoire de M. H. Le Chatelier, *Recherches sur la dissolution* (*Annales des Mines*, février 1897). Voir aussi les *Rapports présentés au Congrès international de Physique de* 1900 : sir W. Roberts Austen et A. Stansfield, t. I, p. 384 ; W. Spring, t. I, p. 416 ; H. du Bois, t. II, p. 477.

Digitized by Google

leur personnalité, c'est-à-dire conservent une partie de leurs caractères spécifiques, et la masse s'en ressent. Ainsi le nickel apporte sa ténacité, sa tendance à la texture fibreuse, son inoxydabilité et éventuellement son magnétisme. Le carbone reste l'élément par excellence dur et fragile, quoiqu'il puisse, dans certains cas, être la cause d'une grande diminution de la dureté et de la fragilité, en maintenant le fer à l'état allotropique γ.

Les aciers à hautes teneurs en nickel et en manganèse réalisent tout particulièrement les conditions que nous venons de signaler comme caractéristiques des dissolutions mutuelles. En effet, le fer forme avec le nickel ou avec le manganèse, en proportions quelconques, des dissolutions parfaitement conformes à la définition donnée ci-dessus, qui peuvent contenir en outre, dans les mêmes conditions, de notables proportions de chrome et de carbone.

Le fer ne dissout pas une proportion quelconque de chrome : nous n'avons pas pu obtenir des aciers homogènes forgeables contenant plus de 30 p. 100 de chrome.

Nous n'avons constaté aucune limite pour la dissolution d'une proportion de chrome dans le nickel ; il est vrai que nous n'avons pas tenté de dépasser 10 p. 100. Par contre, nous n'avons pas pu faire dissoudre 20 p. 100 de manganèse dans du nickel, nous avons été arrêtés à 13 p. 100.

Le fer seul ne retient en dissolution une proportion notable de carbone que lorsqu'on a recours à la trempe, artifice qui maintient le carbone à l'état dissous comme aux températures élevées. La présence du nickel, du manganèse ou du chrome tend aussi à maintenir le carbone en dissolution dans le fer.

Le manganèse paraît être un très bon dissolvant pour tous les éléments constitutifs des aciers, ce qui lui permet de faciliter l'union de certains de ces éléments qui n'ont pas grande tendance à se dissoudre mutuellement. C'est

Digitized by Google

pourquoi il est très utile, et même presque indispensable, pour l'obtention d'aciers homogènes se forgeant bien.

On a vu qu'il favorise beaucoup l'action du carbone sur le fer au point de vue des transformations allotropiques. Le chrome joue ce même rôle mieux encore que le manganèse. Le nickel agit encore de même, mais beaucoup moins efficacement que le manganèse et le chrome.

Certaines influences se combattent dans les dissolutions mutuelles. Tel est le cas lorsque du fer et du chrome sont en présence d'une forte proportion de nickel : les points de transformation de ce dernier métal tendent à se relever sous l'influence du fer et à s'abaisser sous l'influence du chrome ; c'est celle du chrome qui l'emporte (*) lorsque les deux métaux sont présents en proportions égales.

De nombreux indices permettent d'admettre que certains corps, le carbone entre autres, peuvent former entre eux des composés définis, capables de subsister en totalité ou en partie dans la dissolution. Parmi ces composés définis, nous signalerons les carbures doubles de fer et de chrome, ou de fer et de manganèse ; ces corps, lorsqu'ils se forment, peuvent se dissoudre et garder aussi ce que nous avons nommé leur personnalité, ce qui permet de leur attribuer une partie de la dureté et de la fragilité produites par les hautes teneurs en carbone et en chrome des aciers non magnétiques à très basses teneurs en nickel, quoique le maintien du fer à l'état β sous l'influence du carbone paraisse être de beaucoup la principale cause de la dureté et de la fragilité.

Ce sont ces carbures de fer et de chrome qui ont tendance à se liquater dans les aciers au carbone ou au chrome.

On doit, croyons-nous, considérer comme capable de

(*) Voir p. 501.

Digitized by Google

former un acier tout corps qui peut former avec le fer une dissolution mutuelle; et, aux éléments qui ont fait plus particulièrement l'objet de nos recherches, il y a lieu sans doute d'en ajouter un grand nombre, tels que : le tungstène, le molybdène, l'aluminium, le cuivre, le vanadium, le titane, etc., et même, dans une certaine mesure, le silicium, le bore, le phosphore et le soufre.

Les propriétés physiques et mécaniques des aciers constitués par un seul ou plusieurs de ces divers éléments varient avec les proportions de chacun d'entre eux, d'une part en conséquence de leur action directe, résultant de leurs propriétés spécifiques, et, de l'autre, en conséquence de leur action indirecte, résultant de leur influence sur l'état allotropique du fer.

On remarquera que nous dénommons ces dissolutions mutuelles *aciers* et non *alliages*, conformément à une définition donnée par Chevreul, que nous empruntons à un mémoire de M. G. Bresson (*), à savoir : « L'acier est un *état particulier du fer* produit par l'union de ce métal avec des corps dont la nature peut varier. » Cette définition semble avoir été formulée par un allotropiste.

En nous associant aux considérations exposées à ce sujet par M. Bresson, nous ne faisons que suivre l'exemple de M. Hadfield (**).

Transformations allotropiques du fer dans les aciers. — Les transformations allotropiques du fer dans les aciers à hautes teneurs en nickel ou en manganèse se manifestent par la transformation irréversible, ou à grande hystérèse; nous n'avons donc, pour traiter cette question, qu'à rappeler les conclusions de la première partie de notre exposé en les interprétant conformément à la théorie allotropiste.

(*) *Encyclopédie chimique* de M. Frémy, t. V, *les Aciers*.
(**) R. A. Hadfield, *On Manganese steel*, p. 63.

Digitized by Google

Influence de la composition chimique. — Les constatations relatives à la transformation irréversible, dont il a été rendu compte, ont mis en évidence deux phénomènes principaux, qui se produisent lorsque le carbone, le manganèse, le nickel ou le chrome sont en dissolution mutuelle avec le fer. Ces deux phénomènes sont :

1° Un abaissement progressif absolu des points de transformation du fer à l'échauffement et au refroidissement à mesure que la proportion des éléments ci-dessus mentionnés augmente, cet abaissement étant mesuré par l'abaissement du point de transformation à l'échauffement seul;

2° Un abaissement supplémentaire du point de transformation au refroidissement seul, dû à l'hystérèse (*), et mesuré par l'écart qui se produit entre les points de transformation à l'échauffement et au refroidissement.

Nous allons suivre dans leurs diverses manifestations ces deux phénomènes tels qu'ils se produisent dans les aciers, à mesure qu'augmentent les proportions des quatre éléments qui font plus particulièrement l'objet de nos recherches.

Au point de départ, fer pur, l'état allotropique du fer est l'état α, en mélange ou en dissolution mutuelle avec une très faible proportion de fer à l'état β. Les transformations allotropiques se produisent à des températures très élevées sans écart notable des deux points de transformation; la limite d'élasticité est basse, la résistance à la rupture est faible et l'allongement à la rupture est considérable; la perméabilité magnétique est grande.

Les additions d'éléments étrangers maintiennent une proportion notable du fer à l'état β. Elles abaissent en outre généralement les points de transformation du fer,

(*) L'hystérèse dont il s'agit est l'hystérèse de température et non l'hystérèse de champ magnétique. Voir : *l'Hystérésis*, par E. Warburg; *Rapports présentés au Congrès international de Physique de* 1900, t. II, p. 511.

Digitized by Google

et produisent de l'hystérèse, plus forte avec le carbone qu'avec le manganèse, avec le manganèse qu'avec le nickel, avec le nickel qu'avec le chrome ou le cobalt. Le chrome a, indépendamment de son action directe sur les points de transformation du fer, une action sur le carbone pour lui faire produire plus d'abaissement des points de transformation, avec plus d'hystérèse. Mais, tant que le point de transformation au refroidissement reste éloigné de la température ordinaire, le phénomène dont l'importance est prédominante est l'augmentation de la proportion de fer β due à la présence des éléments étrangers. Le cobalt, qui, au moins jusqu'à la teneur de 30 p. 100, relève les points de transformation du fer, n'en agit pas moins, au point de vue de l'augmentation de la proportion de fer β, dans le même sens que le chrome, qui les abaisse lentement, et le nickel, qui les abaisse rapidement.

A mesure que les proportions de ces divers éléments augmentent, une proportion de plus en plus grande de fer est maintenue à l'état β, ce qui s'accuse comme suit : la limite d'élasticité se relève, la résistance à la rupture augmente, l'allongement à la rupture diminue, la dureté et la fragilité augmentent, la striction de l'éprouvette de traction se localise complètement. L'acier reste magnétique à la température ordinaire, mais devient de plus en plus magnétipolaire.

On a reconnu les propriétés des deux premiers groupes d'aciers au nickel proprement dits que nous avons constitués, elles ont pour cause l'existence du fer aux états α et β et l'augmentation progressive de la proportion de fer β.

Une nouvelle période commence lorsque les additions ont amené le point de transformation au refroidissement assez près de la température ordinaire pour qu'une partie du fer soit maintenue à l'état γ : la limite d'élasticité s'abaisse, la résistance à la rupture diminue et l'allonge-

Digitized by Google

ment augmente ; la dureté et la fragilité diminuent. La perméabilité magnétique et le magnétisme rémanent diminuent tout en subsistant encore. Le fer est en partie à chacun des trois états α, β et γ, et le fer γ tend de plus en plus à remplacer les fers α et β.

Ces propriétés sont celles des aciers au nickel proprement dits du troisième groupe.

L'abaissement du point de transformation au refroidissement au-dessous de la température ordinaire a pour résultat de maintenir le fer d'abord aux états β et γ, et bientôt entièrement à l'état γ.

On ne connaît aucun moyen de constater exactement la position du point a_3, où commence la transformation du fer γ en fer β ; l'existence d'une forte proportion du fer à l'état γ ne se manifeste guère que par une diminution de la dureté, mise en évidence par les essais mécaniques. Certains aciers, particulièrement des aciers carburés et chromés, paraissent, si on en juge par leur dureté, contenir une forte proportion de fer β, quoique n'étant plus magnétiques. Dans ce cas, le point a_2 reste à quelque distance du point a_3.

Lorsque le fer est entièrement à l'état γ, la limite d'élasticité est basse, la résistance à la rupture est peu élevée, et l'allongement est très considérable. La dureté est faible et la fragilité merveilleusement réduite, même lorsque l'acier a subi une notable déformation permanente. La striction de l'éprouvette de traction s'étend sur toute sa longueur. Les propriétés mécaniques cessent de varier rapidement sous l'influence de faibles variations de la composition chimique ; l'état allotropique du fer ne se modifie plus.

Les propriétés de ces aciers, qui sont celles du quatrième groupe des aciers au nickel proprement dits, doivent être attribuées presque exclusivement au fer à l'état γ qu'ils contiennent.

Digitized by Google

Le maintien du fer à l'état γ équivaut vraiment à la substitution d'un corps nouveau au fer α, car il a pour effet non seulement de faire disparaître le magnétisme (*), mais encore de modifier presque toutes les propriétés physiques. Nous signalerons, en particulier, une modification profonde des conditions dans lesquelles l'acier se dilate, une augmentation de la densité, une diminution de la conductibilité pour la chaleur et pour l'électricité, une augmentation de la chaleur spécifique (**), etc.

La transformation du fer dans les aciers à hautes teneurs ne se révèle pas par de grands dégagements de chaleur au refroidissement, comme dans le cas des aciers à faibles teneurs. Les grands dégagements de chaleur, correspondant à la transformation du fer γ en fer β, et du fer β en fer α, se produisent assurément toujours, mais ils se répartissent sur une zone de température très étendue, ce qui les rend peu sensibles. Cette constatation démontre, comme plusieurs de celles dont nous avons rendu compte, que les transformations allotropiques du fer se produisent avec une très grande lenteur dans les aciers à hautes teneurs, soit sous l'influence des variations de la température, soit, ce qui est dans une certaine mesure équivalent, sous l'influence des variations des teneurs en carbone, manganèse, nickel et chrome.

Influence des traitements physiques. — Les traitements physiques auxquels les aciers sont habituellement soumis sont : le corroyage à chaud par forgeage ou laminage ;

(*) Plus exactement, le fer devient faiblement magnétique, et obéit aux lois découvertes par M. Curie, comme tous les corps qui possèdent cette propriété.

(**) Ce fait très intéressant a été constaté récemment par M. Bruce Hill à l'Institut de Physique de l'Université de Berlin, sur des aciers adressés par Imphy à l'éminent directeur de cet Institut, M. le professeur Warburg (*Verhandl. der Deutschen Physikal. Gesellsch.*, III, Jahrg, Nr 10.)

Digitized by Google

le recuit à haute ou à basse température ; la trempe après chauffage à haute ou à basse température ; l'écrouissage à froid, effectué par étirage à la filière ou par tout autre mode de déformation à froid.

Nous avons rendu compte de phénomènes complexes auxquels donnent lieu les aciers à hautes teneurs en nickel et en manganèse, soumis à ces traitements, et nous avons constaté que, parmi les résultats obtenus, les uns ont pour cause des modifications d'état allotropique, tandis que les autres ne paraissent dus qu'à des modifications d'état moléculaire. Il reste à interpréter ces phénomènes conformément à la théorie allotropiste.

Corroyage à chaud. — Les effets du corroyage à chaud n'ont été qu'accessoirement l'objet de nos recherches ; il y a lieu cependant de remarquer que les résultats dont nous avons rendu compte, comme obtenus avant recuit, trempe ou écrouissage, sont relatifs à des aciers laminés ou forgés à chaud. Nos recherches ont montré que l'état moléculaire des aciers forgés ou laminés est différent de celui des mêmes aciers recuits, trempés ou écrouis après le forgeage ou le laminage, et il est certain qu'il n'est pas identique à celui des mêmes aciers à l'état de lingot, avant le laminage ou le forgeage.

Ce sont les aciers simplement corroyés à chaud qui, dans nos recherches, ont accusé le plus grand écart entre les points de transformation à l'échauffement et au refroidissement (*), c'est-à-dire le plus d'hystérèse et le plus de

(*) Nous n'avons fait qu'une tentative pour comparer les position des points de transformation d'un même acier à l'état de lingot et à l'état de barre laminée. L'acier contenait, p. 100, 27,68 de nickel, 0,312 de carbone et 0,471 de manganèse. Cet acier, très faiblement magnétique à la température ordinaire, soit à l'état de barrette découpée à la raboteuse dans le lingot, soit à l'état de barre laminée, est devenu un peu plus magnétique à — 78°. Au four chauffé électriquement, il a, dans le premier cas, perdu l'état magnétique à 475° et l'a repris à 300°, et, dans le second, l'a perdu à 425°, et l'a repris au-dessous de 100°. Peut-être le rabotage a-t-il écroui quelque peu la barrette découpée, d'où le relèvement constaté dans le premier cas. C'est à vérifier.

Digitized by Google

stabilité pour le faux équilibre moléculaire qui en résulte. Il faut en conclure que le corroyage à chaud a une grande tendance à maintenir une forte proportion du fer à l'état γ.

Écrouissage à froid. — Au contraire, l'équilibre moléculaire dû à l'hystérèse paraît prendre le maximum de fragilité lorsque les aciers sont écrouis à froid ; l'écrouissage atténue plus que les autres traitements l'intensité de l'hystérèse, il tend à ramener le fer γ à l'état β et à l'état α.

Le diagramme (*fig.* 10) relatif à l'action de l'écrouissage (*) sur les positions des points de transformation des aciers au nickel proprement dits, accuse deux périodes bien distinctes : lorsque le fer est pur, ou additionné d'une faible proportion de nickel, l'écrouissage *abaisse* les points de transformation d'une dizaine de degrés ; lorsque la proportion de nickel est considérable, l'écrouissage *relève* les points de transformation, et notamment relève les points de transformation au refroidissement de plusieurs centaines de degrés ; pendant le passage de la première période à la seconde, l'effet produit par l'écrouissage est *sensiblement nul.*

Ces phénomènes s'expliquent comme suit : le fer, qu'il soit à l'état α ou à l'état γ, tend, sous l'influence de l'écrouissage, à passer à l'état α avec une forte proportion de fer à l'état β. La première période est celle pendant laquelle le fer est à l'état α avec une faible proportion de fer β ; l'écrouissage augmente la proportion de fer β, d'où l'abaissement des points de transformation. La seconde période est celle pendant laquelle une forte proportion de fer est à l'état γ ; l'écrouissage tend à transformer ce fer γ en fers α et β, d'où le relèvement des points de transformation, et, notamment, le relèvement

(*) Les constatations résumées dans ce diagramme sont relatives à des échantillons trempés avant l'écrouissage ; mais la loi est la même dans le cas où l'écrouissage n'est pas précédé de la trempe.

Digitized by Google

très considérable du point de transformation au refroidissement. La période intermédiaire est celle pendant laquelle l'écrouissage ne se produit plus, les essais mécaniques le démontrent comme les déterminations de points de transformation : la limite d'élasticité, trop proche de la résistance à la rupture, ne s'élève plus sous l'action de la déformation à froid, car l'acier est comme écroui d'avance ; on constate en même temps que les points de transformation ne s'élèvent ni ne s'abaissent. C'est que la proportion de fer β a atteint son maximum, et ne peut plus être augmentée par l'écrouissage.

L'action de l'écrouissage sur le point de transformation au refroidissement est particulièrement intense, lorsque le fer est, au moins en partie, à l'état γ, parce que ce traitement tend à détruire l'équilibre moléculaire instable produit par l'hystérèse. Le relèvement de ce point de transformation sous l'influence de l'écrouissage est un phénomène caractéristique de la présence du fer γ dans un acier ; or nous l'avons obtenu avec des aciers à faible teneur en nickel, carburés et chromés, et avec des aciers à teneurs en manganèse peu élevées. On voit que le carbone et le manganèse retardent beaucoup plus encore que le nickel la transformation du fer au refroidissement, et la rendent plus progressive.

Lorsqu'on recuit un acier écroui, les points de transformation relevés disparaissent, en même temps que deux phénomènes caractéristiques de l'état moléculaire produit par l'écrouissage, à savoir des tensions intérieures irrégulièrement distribuées très intenses qui s'étaient produites, et une augmentation considérable de la dureté qui s'était manifestée ; il y a donc au moins coïncidence, si ce n'est relation de cause à effet, entre le relèvement des points de transformation, l'existence de tensions intérieures et l'augmentation de la dureté.

Ce relèvement du point de transformation n'est pas

Digitized by Google

produit par l'écrouissage seul; il n'est obtenu que si, après l'écrouissage, la température est suffisamment abaissée. C'est une condition indispensable pour l'apparition du magnétisme, c'est-à-dire du fer α. Faute d'un abaissement suffisant de la température, le fer reste à l'état γ avec forte proportion de fer β, quoiqu'il ait acquis une tendance beaucoup plus grande à se transformer en fer α, et qu'il se transforme à une température notablement plus élevée que s'il n'était pas écroui.

Le durcissement par écrouissage, poussé à l'extrême, peut ramener à l'état magnétique même les aciers non magnétiques dont le point de transformation est très éloigné au-dessous de 0°. Des copeaux provenant d'un acier non magnétique même dans l'air liquide, prélevés à la surface de pièces fortement écrouies, se sont montrés magnétiques à la température ordinaire. Le fer γ a été amené à l'état α en apparence par l'écrouissage seul, mais en réalité par l'écrouissage et la température ordinaire.

L'effet produit par l'écrouissage sur le fer γ est d'autant plus grand que l'existence du fer δ cet état, à la température ordinaire, est due à un phénomène d'hystérèse plus intense. C'est pourquoi un coup de marteau suffit pour amener à l'état magnétique α une partie du fer γ de l'acier (*) à 12,77 p. 100 de manganèse (102), qui est non magnétique, même à la température de — 78°, lorsqu'il n'est pas écroui.

Recuit. — Le recuit détruit les effets de l'écrouissage, mais il ne rétablit pas l'état moléculaire antérieur, produit par le corroyage à chaud. Qu'il soit effectué avant ou après l'écrouissage, le recuit produit un état moléculaire particulier, caractérisé, au point de vue mécanique, par l'absence de tensions intérieures, et, au point de vue allotropique, par

(*) Voir p. 492.

Digitized by Google

des positions particulières des points de transformation.

Il y a lieu de distinguer le recuit à une température supérieure à celle du point de transformation à l'échauffement du recuit à une température inférieure à celle de ce point de transformation, c'est-à-dire le recuit d'un acier contient le fer à l'état γ, du recuit d'un acier contient le fer aux états α et β.

Le recuit à haute température facilite la transformation du fer γ en fers α et β en atténuant l'hytérèse ; il agit donc comme l'écrouissage, quoiqu'il rende nécessaire un plus grand abaissement de la température pour que le relèvement du point de transformation au refroidissement se produise. Le durcissement produit par le recuit des aciers au nickel ou au manganèse du type à haute limite d'élasticité est ainsi expliqué : il a pour cause une diminution de la proportion de fer γ et une augmentation de la proportion des fers α et β.

Lorsque, n'étant pas suivi d'un abaissement de la température suffisant, il ne transforme pas le fer γ en fer α, avec forte proportion de fer β, le recuit n'a pas d'autre effet qu'une modification de l'état moléculaire de l'acier, qui s'accuse principalement par un abaissement de la limite d'élasticité et une augmentation de l'allongement à la rupture ; c'est le cas des aciers que nous avons dénommés du type à basse limite d'élasticité.

Le recuit à basse température, c'est-à-dire le recuit des aciers contenant le fer à l'état α avec proportion de fer β, diminue l'intensité du magnétisme rémanent, c'est-à-dire la proportion de fer β. Il n'a que peu d'action sur la position des points de transformation, et, loin de relever le point de transformation au refroidissement, il paraît l'abaisser quelque peu. Son action est, au point de vue allotropique, tout à fait différente de celle du recuit à haute température ; il en est de même au point de vue des propriétés mécaniques.

Digitized by Google

Trempe. — Les effets de la trempe rappellent beaucoup ceux du recuit, et s'expliquent de même. Elle agit beaucoup plus rapidement et plus brutalement, en produisant quelques tensions intérieures ; l'état moléculaire qui en résulte n'en est pas moins, semble-t-il, peu différent de celui qui a pour cause le recuit.

Au point de vue allotropique, elle a la même influence que l'écrouissage et le recuit ; elle tend à ramener le fer γ à l'état α avec forte proportion de fer β. Mais, comme l'écrouissage et le recuit, elle ne produit ce résultat que si la température s'abaisse assez pour que la transformation s'effectue. Si cet abaissement de la température ne se produit pas, le fer reste en très grande proportion à l'état γ. Dans ce cas, la trempe n'a pas d'autre effet qu'une modification de l'état moléculaire de l'acier, caractérisée par un abaissement de la limite d'élasticité et une augmentation de l'allongement à la rupture ; mais la tendance à la transformation en fer α avec forte proportion du fer β, quoiqu'elle reste pour ainsi dire latente, est beaucoup plus grande que si l'acier n'avait pas subi la trempe.

La trempe après chauffage à une température inférieure à celle du point de transformation à l'échauffement, c'est-à-dire à une température à laquelle le fer contenu dans l'acier est à l'état α avec proportion du fer β, produit sensiblement les mêmes effets que le recuit à cette même température.

Caractères spécifiques du fer γ. — On voit que le fer γ, quoique n'existant à la température ordinaire qu'à l'état d'équilibre instable, grâce à l'hystérèse, n'en a pas moins une existence bien réelle dans un grand nombre d'aciers parmi ceux qui ont fait l'objet de nos recherches. Ses caractères spécifiques, qui sont mis tout particulièrement en évidence par les traitements physiques, l'éloignent beaucoup du fer α. Il ne durcit pas par la trempe, même

Digitized by Google

lorsqu'il est fortement carburé ; ce traitement l'adoucit comme le recuit. Par contre, il durcit considérablement par l'écrouissage ; cette dernière propriété en fait un métal analogue à la généralité des métaux ductiles, ce qui tend à donner au fer à l'état magnétique α le caractère d'une exception.

Cependant, l'écrouissage des aciers contenant le fer à l'état γ se produit dans des conditions qui ne paraissent pas se produire pendant l'écrouissage des laitons et autres alliages. La transformation moléculaire sous l'influence de la déformation s'effectue *par bonds*, ce qui s'accuse sur les diagrammes des essais à la traction ou à la compression par une succession de *paliers* donnant les limites d'élasticité d'une succession d'états moléculaires différents. Cette allure par bonds rappelle celle des modifications de volume des même aciers sous l'influence du refroidissement signalée par M. Ch.-Ed. Guillaume; peut-être doit-on l'attribuer à l'état d'équilibre instable du fer γ, n'existant à la température ordinaire que grâce à l'hystérèse.

Ces constatations nous paraissent apporter quelque lumière à l'étude comparative des effets de la trempe et de l'écrouissage, à laquelle M. le professeur Howe a consacré une grande partie de son remarquable mémoire sur la trempe de l'acier(*), mémoire dont l'étude nous a été très profitable.

Elles font connaître quelques manifestations nouvelles de la « nature protéiforme du fer », déjà signalée, il y a un siècle, par Bergmann, ainsi que l'a rappelé récemment sir Roberts Austen (**).

(*) Iron and Steel Institute : *la Trempe de l'acier*. Traduit et annoté par M. Osmond (*Bulletin de la Société d'Encouragement*, février 1896).

(**) Iron and Steel Institute. Congrès de 1900 : adresse du Président, traduction de M. Osmond, page 117.

Digitized by Google

Transformations allotropiques du nickel dans les aciers au nickel. — Le nickel peut, comme le fer, exister dans les aciers à des états allotropiques différents ; M. Osmond a dénommé ces états : nickel α et nickel β, nickel magnétique et nickel non magnétique.

Le chrome et le manganèse, dans les alliages qu'ils forment avec le nickel, abaissent ses points de transformation, c'est-à-dire tendent à transformer le nickel α en nickel β. Le fer se comporte autrement lorsqu'il est en proportion peu élevée, il relève les points de transformation du nickel ; cependant, lorsque sa proportion dépasse 30 p. 100, il cesse de relever ces points de transformation, et les abaisse, au contraire, de sorte qu'il tend aussi alors à faire passer le nickel α à l'état β.

La transformation du nickel β en nickel α ne se produit pas brusquement, au refroidissement, à la température du point de transformation ; une partie du nickel reste à l'état β, et se transforme progressivement à mesure que la température s'abaisse ; la variation de l'intensité du magnétisme le révèle (*). Par conséquent, les aciers au nickel à teneurs comprises entre 26 et 70 p. 100 de nickel contiennent une proportion de nickel α de plus en plus forte à mesure que leur teneur en nickel augmente.

Les propriétés mécaniques du nickel β diffèrent peu de celles du nickel α, car, lorsque la teneur en nickel s'élève, les propriétés mécaniques des aciers au nickel varient peu entre les teneurs en nickel de 26 et de 50 p. 100 ; c'est pourquoi les modifications de l'état allotropique du nickel peuvent être considérées par le métallurgiste comme ayant une influence négligeable.

Il n'est cependant pas sans intérêt de rechercher quelle

(*) Voir : *Recherches sur les propriétés magnétiques des aciers au nickel*, par M. E. Dumont (*Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXVI, p. 741 ; 1898).

Digitized by Google

est la cause de l'état magnétique des aciers au nickel. Nous avons, dans une communication antérieure (*), admis, comme conséquence de l'examen du diagramme (*fig.* 7), que le magnétisme des aciers au nickel, qui n'ont pas été refroidis au-dessous de 0°, provient exclusivement du fer, si la teneur en nickel est inférieure à 25 p. 100, et exclusivement du nickel, si la teneur en nickel est supérieure à 26 p. 100.

Cette interprétation des faits exposés a été basée sur les considérations suivantes :

La transformation irréversible et la transformation réversible des aciers au nickel sont des phénomènes distincts.

Les points de transformation irréversible se relient sans interruption aux points de transformation du fer pur, et les points de transformation réversible se relient de même, dans l'état actuel de nos connaissances, aux points de transformation du nickel pur.

Une transformation irréversible se produit, semblable à la transformation irréversible des aciers au nickel, dans les aciers au manganèse et dans l'acier au carbone dénommé austénite. Ces aciers n'accusent aucune transformation analogue à la transformation réversible des aciers au nickel. Cette transformation a, par contre, son analogue dans les alliages nickel-chrome, nickel-manganèse, nickel-cuivre et nickel-étain.

Les propriétés mécaniques des aciers au nickel, quelle que soit leur teneur en nickel, ne se rapportent qu'à deux types seulement : le premier, celui des aciers qui ont subi la transformation irréversible ; le second, celui des aciers qui ne l'ont pas subie. Or les propriétés très différentes de ces deux types d'aciers s'expliquent par la présence du fer à l'état α magnétique, avec une proportion variable

(*) *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 14 mai 1900.

Digitized by Google

de fer β, dans les premiers, et de fer à l'état γ non magnétique, dans les seconds.

Ainsi exposé, le phénomène n'apparaît probablement pas dans toute sa complexité. M. Osmond estime que les maxima des courbes du diagramme doivent indiquer, pour certaines teneurs, la formation de composés définis de fer et de nickel. Il fait, en outre, à notre interprétation les deux objections (*) suivantes : 1° elle n'explique pas la dilatation presque nulle des aciers à 36 p. 100 de nickel, découverte par M. Guillaume; 2° elle attribue au nickel, dans certains aciers ou alliages, une intensité magnétique supérieure à celle que ce métal posséderait s'il était libre.

M. Guillaume, d'autre part, a fait remarquer (**) que notre hypothèse ne fournit aucune base pour l'interprétation des phénomènes de magnétostriction, signalés par MM. Nagaoka et Honda (***) comme constatés sur des aciers au nickel qui ont été mis à leur disposition par Imphy.

Tel est l'état actuel de cette intéressante question.

Influence particulière de chaque élément sur la position des points de transformation allotropique des alliages. — Les trois métaux magnétiques, c'est-à-dire susceptibles de subir la transformation allotropique caractérisée par l'apparition ou la disparition du magnétisme, subissent cette transformation, lorsqu'ils sont à l'état pur : le cobalt vers 1.100°, le fer vers 800° et le nickel vers 340°, et, lorsqu'ils font partie d'alliages, à des températures très différentes. Nous avons vu que le nickel, additionné au

(*) *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIV, p. 596, 10 mars 1902.

(**) *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIV, p. 538, 3 mars 1902.

(***) *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXXIV, p. 536 3 mars 1902.

Digitized by Google

fer, abaisse immédiatement ses points de transformation, et qu'il en est de même lorsqu'on ajoute au fer du carbone, du manganèse ou du chrome, éléments non magnétiques. Le fer n'agit pas de même lorsqu'il est additionné au nickel, car il relève ses points de transformation, tant que sa proportion ne dépasse pas 30 p. 100. Le chrome, le manganèse, le cuivre et l'étain abaissent immédiatement les points de transformation du nickel. Enfin le cobalt, au moins jusqu'à la proportion de 30 p. 100, relève les points de transformation du fer; nous ignorons comment il se comporte au delà.

Il serait prématuré de tirer de ces constatations une loi générale, car il reste à rechercher en particulier quels sont les effets des additions de fer, de nickel, de manganèse et de chrome au cobalt et des additions de cobalt au nickel; cependant il est peut-être intéressant de faire remarquer dès maintenant que les résultats actuellement acquis peuvent se résumer comme suit :

Les métaux magnétiques, en dissolution mutuelle avec un d'entre eux, conservent leurs points de transformation distincts.

Ces points de transformation s'abaissent en présence d'un élément non magnétique ou d'un métal magnétique dont le point de transformation est moins élevé sur l'échelle des températures.

Ils se relèvent, au contraire, en présence d'un métal magnétique dont le point de transformation est plus élevé sur l'échelle des températures, mais si la proportion de ce métal continue à augmenter, le relèvement cesse et se change en abaissement; c'est du moins ce qui se produit dans le cas du fer et du nickel.

Digitized by Google

APPLICATIONS.

Orientation des recherches d'applications nouvelles. — Les applications des aciers au nickel ou au manganèse à hautes teneurs, actuellement réalisées, sont peu nombreuses et peu importantes; ce n'est donc guère que de recherches d'applications nouvelles qu'il peut être question dans cette partie de notre exposé.

En présentant, dans un ordre suggéré par des vues théoriques, des constatations de propriétés physiques et mécaniques, nous avons eu pour objectif bien moins de contribuer à élucider un très intéressant problème de physique moléculaire que de mettre en évidence, parmi les propriétés fondamentales de ces aciers, celles qui sont de nature à diriger les recherches d'applications. Elles ont déjà été souvent signalées dans le cours de notre exposé ; il ne sera cependant pas inutile de les mentionner à nouveau, en faisant connaître, pour chaque variété d'acier, les applications réalisées et celles qui paraissent pouvoir être visées.

Au moment où des efforts incessants cherchent à obtenir des machines et des mécanismes de toutes sortes un meilleur effet utile, n'est-il pas urgent de mettre à leur disposition des matières premières nouvelles, ayant des qualités de premier ordre, telles que celles des aciers qui contiennent de fortes proportions de nickel et autres éléments mis récemment à la disposition de la métallurgie. Se laissera-t-on arrêter par l'augmentation de prix de revient apportée par ces éléments, s'il est constaté qu'ils sont indispensables, par exemple, pour obtenir les augmentations de vitesse, de puissance, de légèreté, tant réclamées par les industries de transport sur terre, sur mer et même dans l'air? Évidemment non. D'ailleurs, le prix de revient ne tardera pas à diminuer rapidement

Digitized by Google

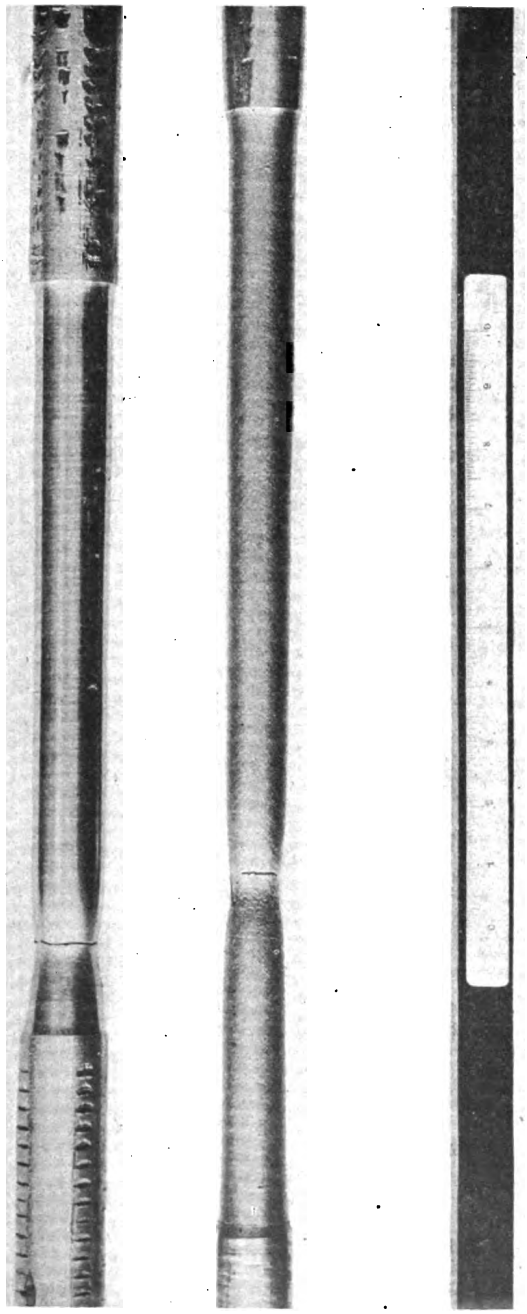


Fig. 13. — Photographie de deux éprouvettes d'essai à la traction d'aciers à 16 p. 100 de nickel, dont l'une est magnétique et l'autre non magnétique.

Digitized by Google

Digitized by Google

lorsque les métaux spéciaux, le nickel en particulier, ayant conquis des débouchés nouveaux, auront trouvé l'écoulement qui, actuellement, leur fait si gravement défaut.

Parmi les notions fondamentales avec lesquelles il importe de se familiariser au moment de commencer des recherches destinées à tirer parti des remarquables qualités de ces variétés diverses d'aciers, il n'en est pas de plus importante que celle des transformations allotropiques du fer. Quoique cette notion soit souvent accueillie avec hésitation par les métallurgistes qui n'ont pas eu l'occasion de soumettre à des essais les aciers au nickel ou au manganèse non magnétiques, il faut bien qu'on se décide à la faire entrer dans la pratique, c'est-à-dire dans la terminologie usuelle des usines. On ne peut plus, en effet, ne pas reconnaître que le fer contenu dans les aciers peut, en présence du nickel, du manganèse, du carbone et du chrome, et aussi d'autres éléments moins connus, exister soit à l'*état magnétique plus ou moins dur*, comme dans les aciers ordinaires au carbone (fer α mélangé d'une proportion plus ou moins grande de fer β), soit à l'*état non magnétique plus ou moins dur* (fer γ mélangé d'une proportion plus ou moins grande de fer β), et que son existence à l'un ou l'autre de ces états allotropiques a une influence vraiment prépondérante sur les propriétés physiques et mécaniques de l'acier.

Cette influence prépondérante est bien mise en évidence par l'examen comparatif de deux éprouvettes d'aciers au nickel dont nous donnons ci-contre (*fig.* 13) une photographie que nous devons à l'obligeance de M. Frémont.

De ces deux aciers, l'un est magnétique, et l'autre non magnétique ; cependant leurs teneurs en nickel sont presque identiques ; mais, dans la première, le fer est à l'état magnétique, et, dans la seconde, il est à l'état non magnétique. Les compositions chimiques de ces aciers sont les suivantes :

Digitized by Google

DÉSIGNATION des échantillons	COMPOSITION CHIMIQUE P. 100				
	Carbone	Silicium	Manganèse	Chrome	Nickel
(26)	0.162	0.117	0.128	»	15.92
(28)	0.533	0.350	0.828	3.02	16.05

L'éprouvette de l'échantillon (26) a été recuite à 400°, et celle de l'échantillon (28) a été trempée au rouge cerise clair ; ces traitements sont les plus favorables respectivement pour augmenter l'allongement à la rupture.

Les éprouvettes de 100 millimètres entre repères se sont comportées très différemment à la traction, l'examen de la photographie permet de s'en rendre compte. L'échantillon (26), acier peu écrouissable, ne s'est guère déformé que dans la région de la rupture ; il est resté brillant, c'est-à-dire à peu près intact hors de cette région ; l'échantillon (28), acier qui s'écrouit fortement, s'est allongé dans toute la longueur de l'éprouvette ; son diamètre a considérablement diminué et sa surface est devenue terne (*).

Les résultats des essais à la traction ont été les suivants :

DÉSIGNATION des échantillons	TRAITEMENTS SUBIS par les échantillons	RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
		Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
(26)	recuit à 400°....	76,2	89,2	19	54,5
(28)	trempé.....	32,8	77,5	73	68

(*) La surface brillante de l'éprouvette magnétique est venue sur la photographie entourée d'un halo, ce qui ne s'est pas produit pour la surface terne de l'éprouvette non magnétique.

Digitized by Google

Les résultats numériques accusent, comme l'aspect des éprouvettes, des propriétés très différentes. On est amené en conséquence à donner à ces deux aciers des applications très différentes : l'un d'eux, le premier, convient très bien pour les épreuves statiques, tandis que le second est merveilleusement préparé pour les épreuves dynamiques. En effet, au point de vue de l'équilibre exclusivement, c'est la haute limite d'élasticité qui est la propriété la plus utile ; et, au point de vue de la quantité de force vive consommée pour produire la déformation qui précède la rupture, c'est le grand allongement à la rupture qui a l'influence prépondérante.

Le travail mécanique nécessaire pour produire la rupture n'a été évalué d'une manière précise, en kilogrammètres, que dans le cas de la rupture par chocs, méthode de M. Frémont ; il aurait été intéressant de la mesurer de même dans le cas de la déformation lente. En effet, une importante consommation de force vive est un frein puissant pour la déformation qui précède la rupture, elle la ralentit, et peut même l'empêcher d'aboutir si l'intensité de l'effort diminue avant qu'il ait eu le temps de produire tout son effet.

Ne disposant pas des appareils nécessaires pour mesurer ce travail mécanique, nous ne pouvons que l'évaluer approximativement. Le travail mécanique correspondant à cette déformation est égal au produit des deux facteurs : effort moyen et allongement à la rupture ; or ce produit est évidemment beaucoup plus grand pour l'acier non magnétique que pour l'acier magnétique, à cause de l'allongement généralisé de toute la pièce, que nous venons de signaler comme une des particularités les plus remarquables des aciers non magnétiques.

A l'essai au choc sur barrettes entaillées, la différence est encore plus accentuée. L'acier magnétique consomme pour rompre environ 15 kilogrammètres, et l'acier non

Digitized by Google

magnétique plus de 40 kilogrammètres, c'est-à-dire le résultat le meilleur que M. Frémont ait jamais obtenu.

On ne peut attribuer qu'à l'état allotropique du fer les différences constatées. Les teneurs en nickel sont les mêmes, et l'adoucissement de l'acier non magnétique ne peut pas avoir pour cause directe les augmentations de teneurs en carbone et en manganèse révélées par l'analyse, ni l'addition d'une proportion de chrome ; ces éléments, qui sont plutôt durcissants, n'ont adouci que parce qu'ils ont maintenu le fer à l'état non magnétique.

Classification générale des aciers à hautes teneurs en nickel, manganèse, chrome et carbone. — Nous ferons la revue des applications auxquelles peuvent donner lieu les divers aciers qui ont fait l'objet de nos recherches, en les classant en quatre groupes analogues à ceux des aciers au nickel proprement dits qui ont été constitués pendant le cours de notre exposé ; on sait que cette classification a pour base l'état allotropique du fer. Ces quatre groupes ont été définis soit par leurs propriétés mécaniques, soit par la composition chimique des aciers qui les composent, soit par la position des points de transformation allotropique du fer qu'ils contiennent; nous donnerons la préférence à cette dernière définition, qui a un caractère plus général :

Premier groupe. — Point de transformation au refroidissement situé au-dessus de la température ordinaire, et ne s'abaissant pas au-dessous de 150°. L'influence de la position du point de transformation au refroidissement sur l'état allotropique du fer est négligeable ; mais cet état allotropique est considérablement modifié par l'action directe des éléments étrangers, qui tend à augmenter la proportion de fer β.

Deuxième groupe. — Point de transformation au refroidissement situé au-dessus de la température ordinaire.

Digitized by Google

entre 100° et 150°. L'influence de la position du point de transformation au refroidissement n'est pas encore bien sensible. La proportion de fer β varie peu.

Troisième groupe. — Point de transformation au refroidissement situé au-dessus de la température ordinaire, mais au-dessous de 100°. Le fer non magnétique apparaît ; sa proportion augmente rapidement à mesure que le point de transformation au refroidissement s'abaisse.

Quatrième groupe. — Point de transformation au refroidissement situé au-dessous de la température ordinaire. Le fer est en totalité non magnétique.

Influence individuelle des divers éléments constituants. — Cette classification ne tient compte des proportions de nickel, manganèse, chrome et carbone qu'au point de vue de leur action sur l'état allotropique du fer, ce qui est, à la rigueur, suffisant, puisque ces éléments peuvent être, dans une large mesure, substitués l'un à l'autre sans que l'état allotropique du fer soit modifié. Cependant chacun des éléments constituants de l'acier a son influence individuelle résultant de ses propriétés particulières.

Le nickel, et même le manganèse et le chrome, qui sont des métaux, modifient l'état allotropique du fer, comme le carbone, mais en donnant à l'acier plus de ténacité et moins de fragilité ; ce métalloïde semble rester dans les aciers le corps très dur qu'il est à l'état de diamant. Le nickel fait bénéficier l'acier de sa texture fibreuse, de sa ténacité, de son inoxydabilité, qualités qui assurent aux aciers au nickel d'importants avantages sur les aciers au carbone et même sur les aciers au manganèse, et qui doivent leur faire donner, dans certains cas, la préférence, malgré l'augmentation très considérable de prix de revient qu'entraîne l'emploi du nickel. Le manganèse apporte plus de dureté que le nickel, mais moins de ténacité.

L'influence individuelle de ces divers constituants est

Digitized by Google

considérable, elle n'en est pas moins généralement beaucoup moindre que celle de l'état allotropique du fer, parce que ce métal est toujours l'élément dominant dans les aciers; c'est pourquoi nous avons, pour orienter les recherches d'applications nouvelles, donné la préférence à une classification tenant compte presque exclusivement de l'état allotropique du fer.

Il convient de remarquer que le nickel et le manganèse, quoiqu'ils jouent, comme le carbone, le rôle d'éléments durcissants, ne peuvent pas donner la dureté aux aciers à un degré comparable à celui qui est atteint dans les aciers au carbone trempés, employés pour la préparation des outils destinés à usiner les métaux. Le nickel, notamment, apporte la ténacité, la ductilité et l'absence de fragilité, et seulement une dureté relative.

Aciers du premier groupe. — Ce sont les aciers au nickel proprement dits à teneurs en nickel ne dépassant pas 15 p. 100, et les aciers au manganèse à teneurs en manganèse inférieures à 7 p. 100. Nous diviserons ce groupe en deux sous-groupes.

Aciers à faibles teneurs en nickel et manganèse. — Nos recherches ayant pris plus particulièrement pour objectif les aciers à hautes teneurs en nickel, manganèse et chrome, nous ne nous laisserons pas arrêter par les aciers à faibles teneurs, malgré le très grand intérêt qu'ils présentent.

Nous entendons par aciers à faibles teneurs ceux dans lesquels la proportion de nickel ne dépasse pas 5 p. 100 et la proportion de manganèse 2 p. 100. Ils peuvent être plus ou moins carburés, dans toute leur masse ou à la surface par cémentation, comme les aciers ordinaires; ce sont des aciers ordinaires modifiés, c'est-à-dire améliorés, par des additions de nickel, ou de manganèse, ou de chrome; ils se comportent à peu près comme les aciers ordinaires,

Digitized by Google

durcissent par la trempe et s'adoucissent par le recuit.

Ce sont assurément de beaucoup les plus répandus parmi les aciers au nickel ou au manganèse, ce qui s'explique facilement. En effet, d'une part, le faible écart de prix de revient que produisent de faibles additions de nickel n'éloigne pas les consommateurs et, de l'autre, des précautions spéciales ne sont pas nécessaires pour le traitement de ces aciers, assez peu différents des aciers ordinaires.

Nous ne nous engagerons pas dans la description des nombreuses variétés d'aciers de cette catégorie employés pour les blindages (*), les canons, les arbres de machines et les petites pièces diverses pour lesquelles on recherche l'augmentation de la ténacité et de la dureté apportée par le nickel seul ou associé au carbone et au chrome. Une revue des applications de ces aciers serait à elle seule une importante étude.

Aciers à fortes teneurs en nickel et manganèse. — Ces aciers ont des propriétés semblables à celles des aciers au carbone demi-durs et durs trempés, avec cette grande différence qu'il n'est pas nécessaire de les tremper pour développer leur qualité. Leurs propriétés sont peu connues; les aciers au nickel contenant 10 à 15 p. 100 de nickel sont généralement considérés comme inutilisables à cause de leur fragilité, quoique les Aciéries de Saint-Étienne aient déjà, à l'Exposition de Lyon, exposé une série d'échantillons d'aciers au nickel de cette catégorie donnant à la traction d'excellents résultats. On a pu constater (Voir tableau VII) qu'ils ne doivent nullement être considérés comme très fragiles.

La limite d'élasticité de ces aciers se relève progressivement, à mesure que leur teneur en nickel ou en

(*) Voir les documents publiés par MM. Schneider et Cie, qui, les premiers, au Creusot, ont rendu pratique l'emploi de l'acier au nickel dans la fabrication des blindages.

Digitized by Google

manganèse augmente. La trempe paraît sans effet bien positif; elle est donc inutile, et même nuisible, vu la nature brutale de son action.

Les aciers au nickel proprement dits, c'est-à-dire peu carburés et peu manganésés, sont, semble-t-il actuellement, les aciers de ce groupe les plus intéressants. Ils sont relativement doux jusqu'à 10 p. 100 de nickel, tout en ayant sur l'acier extra-doux sans nickel, dont ils diffèrent peu comme aspect, l'avantage d'une limite d'élasticité plus élevée, très voisine de la résistance à la rupture, et d'une résistance à la rupture considérable jointe à un bel allongement à la rupture. Le nickel modifie les propriétés mécaniques de l'acier à peu près comme le carbone, mais en l'éloignant beaucoup moins du type acier doux; il relève considérablement la limite d'élasticité sans augmenter beaucoup la fragilité, ce qui est dû sans doute à sa texture fibreuse. Il donne aussi à l'acier une certaine inoxydabilité et la faculté de prendre un beau poli. Le relèvement de la limite d'élasticité est obtenu sans l'intervention de la trempe, ce qui assure une dureté égale à l'intérieur et à l'extérieur des pièces. Il convient d'ajouter que la dureté minéralogique des aciers au nickel est notablement moindre que celle des aciers au carbone qui ont même limite d'élasticité.

Les résultats d'essais à la traction, déjà donnés tableaux II, III, IV et V, peuvent être considérés comme définissant ces aciers au point de vue de l'essai à la traction : les résultats des essais de pliage et de choc montrent qu'ils peuvent remplacer avec avantage, dans bien des cas, les aciers carburés ayant même résistance à la rupture, vu leur supériorité au point de vue de la fragilité. Ces avantages nous paraissent de nature à faire accepter, dans des cas qui deviendront de plus en plus nombreux, le prix de revient relativement élevé des aciers au nickel; il est à craindre cependant qu'ils laissent les

Digitized by Google

consommateurs hésitants encore longtemps, car chaque unité de nickel p. 100 augmente le prix de revient de l'acier d'environ 4 francs par 100 kilogrammes par rapport au prix de l'acier extra-doux de première qualité.

Les applications des aciers au nickel proprement dits de cette catégorie sont jusqu'à présent très peu nombreuses; on emploie plutôt, pour réaliser les mêmes duretés, les aciers au nickel à très faibles teneurs, avec additions de carbone et de chrome, trempés. C'est à tort dans les cas où le prix de revient n'est pas un obstacle, car le carbone apporte de la fragilité; il est vrai qu'il apporte aussi de la dureté minéralogique. Nous ne pouvons guère signaler comme application réalisée des aciers au nickel proprement dits de cette catégorie que des tubes en acier à 12 p. 100 de nickel, demandés par l'Artillerie, qui ont été façonnés par les usines de Montbard.

Ces aciers s'étirent difficilement à froid, surtout aux teneurs supérieures à 10 p. 100 de nickel; par contre, ils se travaillent bien à chaud.

Il convient de n'ajouter qu'avec prudence, aux aciers qui ont ces teneurs en nickel relativement élevées, de fortes proportions de carbone et de chrome; ces additions paraissent être la cause de la schistosité extrêmement prononcée des premiers aciers à 12 p. 100 de nickel préparés par Imphy, qui étaient très remarquables au point de vue de leurs qualités en long, notamment après recuit à 400°, mais n'avaient aucune ténacité en travers à cause de cet état fibreux beaucoup trop accentué.

On peut probablement tenter de substituer du manganèse à tout ou partie du nickel; c'est intéressant au point de vue du prix de revient; il conviendra sans doute, dans ce cas, d'éliminer le plus possible le carbone, qui durcit beaucoup l'acier, surtout en présence du manganèse. Le manganèse agit comme le nickel sur l'état allotropique

Digitized by Google

du fer, mais les aciers au manganèse se sont montrés jusqu'ici très irréguliers, et les aciers mixtes au nickel et au manganèse n'ont pas encore été l'objet d'essais suivis.

Nous considérons les aciers au nickel de 10 à 15 p. 100 comme particulièrement recommandables, vu leurs hautes limites d'élasticité, 100 kilogrammes par millimètre carré environ, combinées avec des résistances au choc de 15 à 20 kilogrammètres sur barrettes entaillées, ensemble de qualités qui leur assure une grande supériorité sur les aciers de carbone de mêmes duretés. Ces conditions étant réalisées sans trempe sont obtenues uniformément dans toute la masse des pièces, avantage parfois très précieux.

Aciers du deuxième groupe. — Ce sont des aciers franchement durs, les plus durs parmi ceux qui font l'objet de ces recherches ; leur dureté n'est cependant pas comparable à celle des aciers carburés les plus durs trempés; il ne peut pas, semble-t-il, être question de remplacer les aciers au carbone par des aciers au nickel ou au manganèse pour la fabrication des outils, tels que les burins.

Les aciers au nickel proprement dits de ce groupe, 15 à 21 p. 100 de nickel, ont, sur les aciers moyennement carburés, l'avantage d'une limite d'élasticité très élevée, très voisine de la résistance à la rupture, avec une résistance au choc notablement plus grande. Ils ont malheureusement un prix de revient beaucoup plus élevé. Il est permis cependant de prévoir, pour eux aussi, des applications intéressantes dans des cas particuliers. On remarquera qu'il parait peu utile de dépasser 15 p. 100 de nickel, si on ne recherche que le relèvement de la limite d'élasticité, ce qui est à noter au point de vue du prix de revient.

Les résultats des essais à la traction avant et après recuit à 400° ou à 900°, que nous avons déjà donnés (tableaux II, III, IV, V), peuvent être considérés comme

Digitized by Google

définissant ces aciers pour l'essai à la traction. De même pour les résultats de pliage (tableaux V et VI), qui sont excellents. Les résultats des essais de choc sur barrettes entaillées (tableau VII) sont bons, relativement à ce qu'on obtient avec les aciers au carbone de duretés semblables. Ces aciers s'usinent à froid dans des conditions satisfaisantes, eu égard à leur haute limite d'élasticité. Ils sont peu oxydables et prennent un très beau poli.

Nous ajouterons que leur haute limite d'élasticité les rend très difficilement étirables à froid à la filière; ils ne conviennent donc pas pour la fabrication des fils.

Nous estimons que cette catégorie d'aciers n'a pas encore été soumise à une étude assez approfondie au point de vue des applications; ses propriétés très remarquables à l'état statique permettront sans doute de lui en découvrir d'importantes, quoiqu'il y ait lieu de l'écarter lorsqu'une grande résistance au choc est nécessaire. Ces aciers, qui permettent d'obtenir des limites d'élasticité de plus de 100 kilogrammes par millimètre carré avec relativement peu de fragilité, et qui s'usinent à froid dans des conditions satisfaisantes, nous paraissent convenir, malgré leur prix de revient élevé, dû à leur forte teneur en nickel, pour la fabrication d'éléments de machines et autres pièces qui subissent de grands efforts sans recevoir des chocs très violents, et qui ne doivent jamais subir la moindre déformation permanente.

Une petite proportion de chrome (1 p. 100 environ), mais avec très peu de carbone, paraît avoir une influence favorable; cependant il y a lieu de veiller à ne pas produire de schistosité.

Il est permis d'espérer qu'on parviendra à préparer des aciers au manganèse possédant des propriétés voisines de celles des aciers au nickel de ce groupe, et pouvant être obtenus à prix de revient beaucoup moindre; mais ce résultat n'a pas encore été atteint régulièrement. Nous

Digitized by Google

avons cependant pu signaler un acier au manganèse à 8,29 p. 100, dont les propriétés mécaniques à la traction sont remarquables et qui n'est pas sans quelque valeur à l'essai au choc (Voir les tableaux XXXI et XXXII).

Aciers du troisième groupe. — Les aciers au nickel proprement dits de ce groupe ont des teneurs comprises entre 21 et 27 p. 100 de nickel; les aciers au nickel carburés ou chromés qui en font partie ont des teneurs en nickel d'autant plus réduites que la teneur en carbone est plus forte.

Tous ces aciers durcissent considérablement par la trempe, parce que la proportion de fer non magnétique qu'ils contiennent est mise par ce traitement en état d'être transformée en fer magnétique sous l'influence de la température ordinaire.

Ces aciers ne sont pas durs lorsque leur point de transformation au refroidissement est très proche de la température ordinaire; ils peuvent alors être tréfilés, ce qui les fait préférer aux aciers du groupe précédent, pour les applications qui exigent un étirage à froid.

Nous ne connaissons actuellement aucune application de ces aciers en dehors de celles que les travaux de MM. Ch.-Ed. Guillaume et L. Perret ont permis de leur découvrir dans l'horlogerie. Cette industrie utilise leur propriété particulière d'intermédiaires entre les aciers magnétiques et les aciers non magnétiques, propriété qui a des conséquences intéressantes au point de vue de la variation de l'élasticité avec la température.

Ceux des aciers de ce groupe qui contiennent beaucoup de fer non magnétique ne sont pas durs à la température ordinaire; mais ils le deviennent lorsqu'ils sont soumis à un refroidissement intense. Cette propriété remarquable pourra probablement, dans certains cas, être utilisée soit pour durcir après usinage achevé à l'état

Digitized by Google

doux, soit pour durcir seulement en certains points des pièces. Des résultats remarquables ont été obtenus dans cet ordre d'idées avec des aciers contenant du chrome (Voir tableau XXII). Mais ce procédé ne permet pas de dépasser notablement une limite d'élasticité de 130 kilogrammes par millimètre carré avec une résistance à la rupture de 150 kilogrammes par millimètre carré et 3 ou 4 p. 100 d'allongement à la rupture. Les résultats inscrits au tableau XIII, obtenus en soumettant des aciers de cette catégorie au refroidissement dans la neige carbonique et l'air liquide, ont montré qu'on ne doit pas compter sur le refroidissement pour obtenir des duretés beaucoup plus grandes que celles des aciers du deuxième groupe.

Les aciers au manganèse de ce groupe n'ont pas été suffisamment étudiés pour qu'il soit possible de leur désigner des applications.

Aciers du quatrième groupe. — Il convient d'examiner séparément les principales variétés d'aciers qui forment ce groupe ; elles ont toutes pour caractère principal d'être à basse limite d'élasticité, c'est-à-dire déformables par un effort assez faible, et à grand allongement à la rupture. Il en est de particulièrement intéressantes, sur lesquelles il est bon d'attirer bien spécialement l'attention, comme très remarquables par leur grand allongement à la rupture et leur résistance au choc exceptionnelle.

Aciers au nickel proprement dits. — Ce sont les aciers à teneurs en nickel supérieures à 27 p. 100. Leurs qualités à la traction sont définies par les essais que nous avons donnés tableaux II et IX ; leur limite d'élasticité est peu élevée et très éloignée de la résistance à la rupture. Leur allongement à la rupture est grand et ils sont très peu fragiles à l'essai de choc (Voir tableau VII).

Digitized by Google

Leur résistance au travail à chaud est considérable, le matériel employé doit être robuste; mais ils s'étirent à froid dans des conditions satisfaisantes peu différentes de celles de l'acier doux ordinaire. Ils durcissent beaucoup par l'écrouissage. Ces aciers peuvent être employés avec avantage pour leur inoxydabilité, pour leur poli, leur grand allongement à la rupture, leur résistance au choc. Ils peuvent être tréfilés ou étirés en fils ou en tubes, d'où leur emploi pour tubes de chaudières; l'Administration de la Marine étudie cette application.

L'acier très peu dilatable, dit invar, découvert par M. Ch.-Ed. Guillaume, fait partie de cette catégorie; il est employé avec grand avantage par l'industrie horlogère et pour les appareils de précision, notamment pour la géodésie.

Les aciers à teneurs comprises entre 43 et 50 p. 100 de nickel, qui ont les mêmes coefficients de dilatation que les verres et les cristaux, font aussi partie de cette catégorie; ils ont une importante application dans la fabrication des lampes à incandescence pour remplacer le platine. Ils sont aussi employés avec avantage dans la fabrication des verres armés par le procédé L. Appert.

Ces aciers sont magnétiques, quoiqu'ils contiennent le fer à l'état non magnétique; le magnétisme provient du nickel.

Aciers au nickel chromés. — Les additions de chrome sans carbone exercent une influence favorable sur ces aciers ; le chrome relève la limite d'élasticité et augmente la résistance à la rupture sans diminuer l'allongement à la rupture.

L'introduction de ce métal est utile, car les aciers au nickel proprement dits sont souvent trop mous.

Aciers au nickel carburés et chromés. — L'addition du carbone, combinée à celle du chrome, produit un ensemble de résultats des plus favorables pour la majorité des appli-

Digitized by Google

cations. Cette catégorie, qui est celle des *aciers au nickel non magnétiques*, ne saurait être trop recommandée. Elle a déjà donné lieu à d'importantes applications ; Imphy en a livré de gros tonnages ; mais il reste à tirer parti de ses qualités exceptionnelles dans les cas nombreux où une importante consommation de force vive se produisant à la rupture peut être utilisée, soit en particulier ceux où une résistance au choc très considérable est inappréciable. Parmi les applications qui nous paraissent particulièrement intéressantes, nous citerons les pièces de machines, le matériel roulant de chemins de fer, tramways, voitures, automobiles, la marine militaire et marchande, pour lesquelles on recherche une grande résistance au choc sous un faible poids.

Mais ces aciers ne doivent pas être employés pour des pièces qui ne peuvent subir aucune déformation permanente sans être mises au rebut. Ils semblent convenir très bien, par exemple, pour les crochets de traction, pour lesquels la résistance aux chocs est la condition la plus importante à réaliser. On sait que ces aciers peuvent subir des déformations à froid très notables sans devenir fragiles.

La composition chimique la plus favorable pour les aciers de cette catégorie paraît actuellement être : environ 20 p. 100 de nickel, 0,5 p. 100 de manganèse, 0,5 p. 100 de carbone et 2 à 3 p. 100 de chrome. On remarquera que le fer est ainsi maintenu à l'état non magnétique à moins de frais que lorsque le nickel seul est employé. Des aciers non magnétiques d'excellente qualité ont été obtenus avec 16 p. 100 de nickel (Voir tableaux XXII et XXIV), et cette proportion pourra peut-être être encore réduite, quoique les tentatives faites par Imphy dans cette direction n'aient guère abouti au-dessous de 16 p. 100. Au-dessus de cette limite, le carbone et le chrome associés ont, outre l'avantage de réduire le prix

Digitized by Google

de revient, celui de relever considérablement la limite d'élasticité et la résistance à la rupture sans diminuer l'allongement à la rupture, et même en l'augmentant.

Ces aciers non magnétiques peuvent être étirés à froid; l'écrouissage leur donne, lorsqu'ils ont subi ce traitement, assez de dureté et d'élasticité pour qu'ils puissent être employés avec avantage à la fabrication des ressorts, en concurrence avec les aciers ordinaires au carbone trempés. C'est une très bonne démonstration de l'analogie qui existe entre les effets de l'écrouissage sur ces aciers et ceux de la trempe sur les aciers au carbone. On sait que l'écrouissage est pour les aciers contenant le fer à l'état non magnétique le moyen d'obtenir, au moins superficiellement, un durcissement considérable, et même le seul moyen, puisque la trempe les adoucit.

A côté des remarquables avantages qu'ils présentent, ces aciers ont le sérieux inconvénient d'exiger un matériel très puissant pour le travail à chaud, laminage, forgeage, emboutissage, et de ne pouvoir être traités à froid que très lentement, soit à l'étirage à la filière, soit à l'usinage, au tour, à la raboteuse, etc.; ce sont des conditions qui arrivent à être onéreuses, dont il importe de tenir compte dans l'établissement des prix de revient.

Aciers au manganèse. — Les aciers à hautes teneurs en manganèse, 18 p. 100 par exemple, ont des propriétés peu différentes de celles des aciers au nickel carburés et chromés, ils contiennent comme eux le fer à l'état non magnétique. M. Hadfield a fait connaître, depuis longtemps déjà, leurs remarquables propriétés; nous venons d'obtenir avec ces aciers des résultats d'essais au choc qui achèvent de démontrer que, lorsqu'ils sont bien préparés, ce sont (Voir tableaux XXXI et XXXII) de bons aciers, quoiqu'ils soient onéreux à usiner à froid. Malheureusement, ils se sont montrés jusqu'ici assez irréguliers; ils n'en ont pas moins déjà un certain débouché.

Digitized by Google

Aciers mixtes au nickel et au manganèse. — D'intéressants résultats ont été obtenus dans cette voie; mais ils sont trop peu nombreux pour qu'il soit possible de se rendre compte des applications particulières qui pourraient leur être réservées.

CONCLUSION.

Cherchant à dégager, de l'ensemble des faits exposés, les indications les plus importantes pouvant être utilisées dans les recherches d'applications nouvelles des aciers au nickel à hautes teneurs, nous les formulerons comme suit:

Les aciers au nickel, plus ou moins manganésés, carburés et chromés, sont semblables aux aciers ordinaires au carbone, tant que les proportions de nickel, manganèse, chrome et carbone *ne dépassent pas une certaine limite*. Au-dessous de cette limite, le nickel, le manganèse et le chrome, seuls ou associés au carbone, jouent dans ces aciers le rôle d'éléments durcissants, comme le carbone dans les aciers ordinaires, et peuvent être dosés de manière à donner toute la gamme des duretés, sans permettre cependant d'atteindre le même degré de dureté que les aciers au carbone trempés les plus durs.

Au delà d'une certaine limite, les additions de ces éléments produisent une transformation allotropique du fer contenu dans les aciers, qui fait apparaître des propriétés physiques et mécaniques très différentes de celles des aciers ordinaires rappelant plutôt celles du laiton, du cuivre, du nickel et d'autres alliages ou métaux. Les aciers s'adoucissent alors considérablement par la trempe et ne durcissent que par l'écrouissage. Les propriétés mécaniques de certains d'entre eux sont très remarquables, particulièrement au point de vue de l'allon-

Digitized by Google

gement à la rupture, qui est exceptionnel, et de la résistance au choc, qui dépasse celle de tous les alliages ou métaux connus.

Un domaine tout nouveau est donc ouvert à la métallurgie du fer par l'étude des aciers à hautes teneurs en nickel et en manganèse. En même temps, le domaine ancien est considérablement élargi, car il est doté d'éléments durcissants nouveaux, moins nuisibles que le carbone, au point de vue de la fragilité.

Digitized by Google

BIBLIOGRAPHIE.

PRINCIPAUX OUVRAGES CONSULTÉS.

ABRAHAM. — *Etude sur certains aciers spéciaux.* — *Annales des Mines*, septembre 1898.

BABUT. — *La fabrication et le travail des aciers spéciaux.* Congrès international des Mines et de la Métallurgie. Exposition universelle de 1900.

BOIS (H. DU). — *Propriétés magnétiques de la matière pondérable.* — *Rapports présentés au Congrès international de Physique de* 1900, t. II, p. 460.

BRESSON (G.). — *Les aciers.* — *Encyclopédie chimique*, publiée sous la direction de M. Frémy ; 1886.

BRUCE HILL. — *Ueber die calorimetrischen Eigenschaften der ferromagnetischen Körper.* — *Aus den Verhandl. der Deutschen Physikal. Gesellsch.* III, Jahrg. Nr 10. — *Ueber das magnetische Verhalten der Nickel-Kupfer und Nickel-Zinnlegirungen.* — Même publication. IV, Jahrg. Nr 9.

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES. — *Procès-verbaux des séances* de 1897, 1899 et 1900.

CURIE (P.). — *Propriétés magnétiques des corps à diverses températures.* Thèse, mars 1895. Gauthier-Villars.

CURIE (Mme Sklodowka). — *Propriétés magnétiques des aciers trempés.* — *Bulletin de la Société d'Encouragement*, janvier 1898.

DUMONT (E). — *Propriétés magnétiques des aciers au nickel.* — *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXVI, p. 741 ; 1898.

FONDERIES, FORGES ET ACIÉRIES DE SAINT-ETIENNE (Cie DES). — *Notice de l'Exposition universelle de Lyon*, 1894.

FRÉMONT. — *Evolution des méthodes et des appareils employés pour l'essai des matériaux de construction.* — Congrès international des méthodes d'essai des matériaux de construction à l'Exposition universelle de 1900.

— *Essai des métaux par pliages de barrettes entaillées.* — *Bulletin de la Société d'Encouragement*, septembre 1901.

GAGES. — *Essai sur la théorie générale des aciers.* — *Revue d'artillerie*, octobre, novembre et décembre 1898, février 1899.

GUILLAUME (Ch.-Ed.). — *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences.* — *Recherches sur les aciers au nickel*, 25 janvier, 5 avril,

Digitized by Google

18 juin et 26 juillet 1897. *Variations du volume des alliages irréversibles*, 7 mars 1898. *Sur les variations temporaires et résiduelles des aciers au nickel réversibles*, 17 juillet 1899. *Remarques sur les recherches de MM. Nagaoka et Honda*, 3 mars 1902.

— *Calcul d'un pendule composé en acier au nickel*, Genève, 1897.

— *Recherches sur les aciers au nickel.* — *Bulletin de la Société d'Encouragement*, mars 1898.

— *Recherches sur le nickel et ses alliages*, Gauthier-Villars, 1898.

— *Études sur le balancier compensateur.* Genève, 1899.

— *L'erreur secondaire des chronomètres.* — Extrait du *Journal suisse d'horlogerie*, mai 1902.

Hadfield (Robert Abbot). — *Manganese steel.* — *Excerpt Minutes of Proceedings of the Institution of civil Engineers*, 1888.

— *Alloys of iron and nickel.* — *Excerpt Minutes of Proceedings of the Institution of civil Engineers*, 1899.

Hopkinson (J.). — *Proc. of the Roy. Soc.* — *Magnetic properties of alloys of nickel and iron.* Rec. 2 décembre 1899. — *Physical. properties of nickel steel.* Rec. 16 janvier 1890.

Howe (Henry M.). — *Researches on the hardening of steel.* — *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1896. — *La Trempe de l'acier*, traduit et annoté par M. Osmond. — *Bulletin de la Société d'Encouragement*, février 1896.

— *La métallurgie de l'acier*, traduction Octave Hock.

Le Chatelier (H.). — *Sur la résistance électrique du fer et de ses alliages aux températures élevées.* — *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. CX, p. 283.

— *Sur la résistance électrique des métaux.* — *Id.*, t. CXI, p. 455.

— *Recherches sur la dissolution.* — *Annales des Mines*, février 1897.

— *L'état actuel des théories de la trempe de l'acier.* — *Revue générale des Sciences*, 12 janvier 1897.

Nagaoka et Honda. — *La magnétostriction des aciers au nickel.* — *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXXIV, p. 536.

Osmond. — *Considerations on permanent magnetism.* — From *the Philosophical Magazine*, for June 1890.

— *Recherches sur les aciers chromés.* — *Mémorial de l'Artillerie de la marine*, 1893.

— *Sur les alliages de fer et de nickel.* — *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t. CXVIII, p. 532.

— *Sur la trempe des aciers extra-durs.* — *Id.*, t. CXXI, p. 684.

— *Sur les alliages de fer et de nickel.* — *Id.*, t. CXXVIII, p. 304.

— *De l'effet des basses températures sur certains aciers*, t. CXXVIII, p. 1395.

Digitized by Google

— *Sur les aciers à aimants.* — *Id.*, t. CXXVIII, p. 1513.
— *Remarques sur une note récente de MM. Nagaoka et Honda, relative à la magnétostriction des aciers au nickel.* — *Id.*, t. CXXXIV, p. 596.
— *La méthode de refroidissement.* — Commission des méthodes d'essai des matériaux de construction, octobre 1894.
— *Note on M. Howe's researches on the hardening of steel.* — *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1894.
— *Experiments on alloys of iron and steel.* — *Excerpt Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1899.
— *What is the inferior limit of the Critical point a_2?* — *The Metallographist* of July, 1899, Boston, Mass., U. S. A.
— *Sur la cristallographie du fer.* — *Annales des Mines*, janvier 1900, p. 110.
Osmond et Werth. — *Théorie cellulaire des propriétés de l'acier.* — *Annales des Mines*, 1885.
Pourcel. — *Acier sans soufflure.* — *Génie civil*, 15 avril 1881.
— *Solid steel.* — *Journal of the Iron and Steel Institute*, 1882.
— *Bulletin de l'Industrie minérale*, 6 janvier 1883.
Pralon. — *Sur les essais à la traction des cuivres et des laitons.* — *Revue d'artillerie*, avril-juin 1898.
Roberts Austen (Sir W.). — *On certain Mechanical Properties of metals considered in relation to the Periodic Law.* — *Proc. of the Roy. Soc.*, mars 1888.
— *Adresse du président.* - *Iron and Steel Institute*, Congrès de 1900. — Traduction de M. Osmond.
Roberts Austen (Sir W.) et A. Stansfield. — *La constitution des alliages métalliques.* — *Rapports présentés au Congrès international de Physique de* 1900, t. I, p. 363.
Société d'encouragement pour l'industrie de Berlin. — *Propriétés des alliages de fer et de nickel.* — *Bulletin de la Société d'Encouragement*, traduction de M. T. Castagnol.
Spring (W.). — *Propriétés des solides sous pression ; diffusion de la matière solide ; mouvements internes de la matière solide.* — *Rapports présentés au Congrès international de Physique de* 1900, t. I, p. 402.
Tschernoff. — *De la structure de l'acier.* — *Observations sur son industrie et sur son mode de fabrication.* — *Bulletin de la Société technique russe*, avril-mai 1868, et *Revue universelle des mines et de la métallurgie*, 1re sem. 1880, VII, 129.
Warburg. — *L'hystérésis.* — *Rapports présentés au Congrès international de Physique de* 1900, t. II, p. 509.

Digitized by Google

TABLE DES FIGURES.

FIGURES.

Pages.

1. — Aciers au nickel proprement dits. Diagramme des résultats des essais à la traction. Eprouvettes prélevées dans des barres laminées, non recuites..... 370
2. — Aciers au nickel proprement dits. Diagramme des résultats des essais à la traction. Éprouvettes prélevées dans des barres laminées, recuites à 400°..... 379
3. — Diagramme des expériences de J. Hopkinson sur le magnétisme des aciers à 25 p. 100 de nickel..... 397
4. — Diagramme des expériences de M. Osmond sur les positions des points de transformation allotropique des aciers au nickel de 0 à 100 p. 100 de nickel..... 400
5. — Four chauffé électriquement employé à Imphy pour les déterminations de points de transformation..... 405
6. — Schéma général de l'installation du four chauffé électriquement..... 405
7. — Diagramme des positions des points de transformation allotropique des aciers au nickel proprement dits, de 0 à 100 p. 100 de nickel..... 408

7 *bis*. — Diagramme des positions des points de transformation allotropique des aciers au nickel proprement dits, de 20 à 30 p. 100 de nickel..... 410

8. — Diagramme des expériences de M. Ch.-Ed. Guillaume sur les modifications de volume d'un acier à 15 p. 100 de nickel. 420
9. — Diagramme des expériences de M. Osmond sur le magnétisme rémanent de deux aciers au nickel à 15,48 et 19,44 p. 100 de nickel..... 428
10. — Diagramme des positions des points de transformation allotropique des aciers au nickel proprement dits trempés et écrouis..... 434
11. — Diagramme des positions des points de transformation allotropique irréversible des aciers au manganèse, au nickel et au chrome..... 498
12. — Diagramme des positions des points de transformation réversible des alliages nickel-chrome, nickel-manganèse et nickel-fer..... 507
13. — Photographie de deux éprouvettes d'essai à la traction d'aciers à 16 p. 100 de nickel, dont l'une est magnétique et l'autre non magnétique..... 535

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES.

Introduction.

Pages.
Premières recherches d'Imphy..... 358
Travaux du Bureau International des Poids et Mesures..... 359

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DES ACIERS AU NICKEL A HAUTES TENEURS.

DIVISION DES ACIERS AU NICKEL A HAUTES TENEURS EN QUELQUES GROUPES PRINCIPAUX.

Premiers essais de classification..... 362
Influence des éléments autres que le fer et le nickel..... 363
Composition chimique des principaux échantillons utilisés dans ces recherches..... 365
Programme qui sera suivi pour l'exposé des propriétés physiques et mécaniques des aciers au nickel..... 368

PREMIÈRE PARTIE.

Aciers au nickel proprement dits.

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

Choix d'échantillons formant une série d'aciers au nickel proprement dits..... 368
Propriétés mécaniques avant et après recuit..... 369
Essais à la traction avant recuit..... 369
Essais à la traction après recuit..... 376
Essais à la traction en travers..... 380
Essais de pliage statique..... 381
Essais de pliage par chocs..... 381
Essais de choc sur barrettes entaillées..... 382

Digitized by Google

Pages.
Effets de la trempe..... 385
Effets de l'écrouissage..... 388
Effets du corroyage à chaud..... 393

TRANSFORMATIONS ALLOTROPIQUES.

États allotropiques différents des aciers à haute et basse limite d'élasticité..... 394
Travaux antérieurs..... 496
Recherches nouvelles:
Aciers subissant concurremment les transformations irréversible et réversible..... 401
Procédés employés pour les déterminations de points de transformation allotropique..... 402
Résultats des déterminations..... 407
Positions des points de transformation irréversible..... 411
Positions des points de transformation réversible..... 413
Les transformations irréversible et réversible sont des phénomènes distincts..... 418

Propriétés physiques et mécaniques résultant de la transformation irréversible.

Variations de l'état allotropique des aciers au nickel sous l'influence des variations de la température..... 419
Effets du refroidissement par la neige carbonique..... 422
Effets du refroidissement par l'air liquide..... 424
Effets du relèvement de la température..... 426
Variations de l'état allotropique des aciers au nickel résultant des variations de la teneur en nickel..... 429

Modifications de l'état allotropique sous l'influence de la trempe, de l'écrouissage et du recuit.

Positions des points de transformation allotropique..... 430
Déterminations de points de transformation après trempe et écrouissage..... 431
Examen des résultats obtenus..... 435
Effets du recuit sur les positions des points de transformation après trempe et écrouissage..... 439
Effets du recuit sur les positions des points de transformation avant trempe et écrouissage..... 441
Hystérèse..... 443
Distinctions entre les aciers au nickel de diverses teneurs résultant des effets de la trempe et de l'écrouissage..... 444

Digitized by Google

DEUXIÈME PARTIE.

Aciers au nickel carburés, chromés et manganésés.

Pages.

Influence des teneurs en carbone, chrome et manganèse sur les propriétés mécaniques des aciers au nickel..... 447
Influence des mêmes éléments sur l'état allotropique des aciers au nickel..... 448

Première catégorie.

ACIERS AU NICKEL CARBURÉS.

Etat allotropique :
Position des points de transformation allotropique..... 450
Action du carbone..... 452
Action de la trempe et de l'écrouissage..... 454
Propriétés mécaniques :
Essais à la traction..... 455
Effet du refroidissement à — 78°..... 459

Deuxième catégorie.

ACIERS AU NICKEL CHROMÉS.

Utilité du chrome..... 461
État allotropique :
Position des points de transformation allotropique..... 461
Action du chrome..... 465
Aciers au chrome sans nickel..... 466
Position des points de transformation allotropique des aciers au nickel chromés après trempe et écrouissage..... 470
Propriétés mécaniques :
Essais à la traction..... 472
Essais au choc..... 479
Propriétés mécaniques des aciers au chrome sans nickel..... 481
Effets du refroidissement à — 78° sur les propriétés mécaniques des aciers au nickel chromés..... 482
Effets de l'étirage à froid sur les propriétés des aciers au nickel chromés..... 485

Digitized by Google

Troisième catégorie.

ACIERS AU NICKEL MANGANÉSÉS.

Pages.
Rôle du manganèse..... 486
État allotropique :
Position des points de transformation allotropique..... 486
Aciers au manganèse sans nickel..... 488
Propriétés mécaniques :
Essais à la traction..... 492
Propriétés mécaniques des aciers au manganèse sans nickel.... 493
Essais à la traction..... 494
Essais de choc..... 495

TROISIÈME PARTIE.

Conclusions relatives à la transformation irréversible

QUATRIÈME PARTIE

Aciers et alliages à très hautes teneurs en nickel, chrome et manganèse.

Influence du nickel, du carbone, du chrome, du manganèse et du fer sur la transformation réversible..... 499
Propriétés mécaniques de quelques aciers ou alliages à très hautes teneurs en nickel et chrome..... 502
Alliages nickel-chrome..... 503
Alliages nickel-manganèse..... 505
Alliages nickel-fer..... 506

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE QUELQUES ACIERS AU COBALT

Rôle du cobalt..... 508
Etat allotropique..... 509
Propriétés mécaniques..... 509

VUES THÉORIQUES

Avant-propos..... 512
Transformations allotropiques du fer. Théorie de M. Osmond.... 513
Etat de dissolution mutuelle..... 515
Transformations allotropiques du fer dans les aciers..... 518
Influence de la composition chimique..... 519
Influence des traitements physiques..... 522

Digitized by Google

Pages.

Corroyage à chaud..... 523
Ecrouissage à froid..... 524
Recuit..... 526
Trempe..... 528
Caractères spécifiques du fer γ..... 528
Transformations allotropiques du nickel dans les aciers..... 530
Influence particulière de chaque élément sur la position des points de transformation allotropique des alliages..... 532

APPLICATIONS.

Orientation des recherches d'applications nouvelles..... 534
Classification générale des aciers à hautes teneurs en nickel, manganèse, chrome et carbone..... 538
Influence individuelle des divers éléments constituants..... 539
Aciers du premier groupe..... 540
Aciers du deuxième groupe..... 544
Aciers du troisième groupe..... 546
Aciers du quatrième groupe..... 547
Conclusion..... 551

Bibliographie..... 553
Table des figures..... 556

Digitized by Google

BULLETIN.

PRODUCTION MINÉRALE ET MÉTALLURGIQUE DES ILES BRITANNIQUES PENDANT L'ANNÉE 1900.

DÉSIGNATION des SUBSTANCES EXTRAITES	QUANTITÉS	VALEUR sur les EXPLOITATIONS	PRIX moyen
1° *Substances minérales.*			
	tonnes	francs	fr. c.
Houille	228.784.200	3.068.078.471	13,41
Schistes bitumineux	2.318.737	15.834.226	6,83
Minerai de fer	14.252.659	106.539.368	7,47
— des marais	4.219	26.178	6,20
Pyrites de fer	12.475	145.973	11,71
Minerai de plomb	32.522	8.804.151	270,71
— de zinc	25.070	2.461.623	98,19
— de cuivre	9.254	870.166	94,03
Cuivre de cément	386	61.789	160,07
Minerai d'or	21.135	1.082.569	51,22
— d'étain (dressed)	6.909	13.205.293	1.911,32
— d'uranium	42	38.259	910,93
— de manganèse	1.384	17.023	12,30
Wolfram	9	8.852	983,56
Ocre, terre d'ombre, etc	15.443	337.898	21,88
Arsenic	4.146	1.690.446	407,77
Pyrites arsenicales	9.726	219.666	22,59
Spath-fluor	1.471	40.453	27,50
Gypse	211.367	1.756.371	8,31
Barytine	29.927	737.534	24,64
Sulfate de strontiane	9.267	115.003	12,41
Bauxite	5.871	34.047	5,80
Argiles	14.274.489	39.621.705	2,77
Ardoises	595.233	38.544.634	64,75
Phosphate de chaux	630	27.364	43,43
Craie	4.443.304	5.246.567	1,18
Pierres à chaux (autres que craie)	12.095.965	32.793.919	2,71
Silex, cailloux	78.936	350.558	4,44
Gravier et sable	1.866.597	3.484.471	1,76
Grès	15.100.192	40.000.055	7,84
Basalte	4.708.450	31.241.199	6,63
Schistes alumineux	1.329	4.136	3,11
Sel	1.891.129	15.432.622	8,16
Valeur totale des substances minérales.	»	3.428.852.589	»

Digitized by Google

DÉSIGNATION des SUBSTANCES EXTRAITES	QUANTITÉS	VALEUR sur les EXPLOITATIONS	PRIX moyen
2° *Métaux* (*).			
	tonnes	francs	fr. c.
Fonte	9.103.046	948.810.485	104,23
Cuivre	61.181	119.918.529	1.947,33
Plomb	42.000	17.927.700	426,85
Zinc	24.914	12.863.596	516,32
Etain	9.010	30.807.893	3.419,30
Aluminium	569	1.836.000	3.226,74
Or (en kilogrammes) (**)	491kg	1.482.820	3.020,00
Argent (id.) (**)	15.560	1.485.307	95,45
Valeur totale des métaux	»	1.135.132.330	»

(*) Y compris les métaux tirés de minerais importés.
(**) Y compris l'or et l'argent tirés des pyrites auro-argentifères importées, mais non compris l'or et l'argent obtenus par la fusion des autres minerais d'or et d'argent importés ou des plombs d'œuvre.

PRODUCTION DE LA HOUILLE PAR COMTÉ.

COMTÉS	QUANTITÉS	VALEUR sur les EXPLOITATIONS
Angleterre.		
	tonnes	francs
Chester	710.642	9.261.087
Cumberland	2.054.684	23.514.548
Derby	15.489.293	201.840.099
Durham	35.357.530	452.441.025
Gloucester	1.603.640	25.874.484
Lancaster	25.240.352	337.144.213
Leicester	2.140.146	28.774.910
Monmouth	9.975.930	148.578.510
Northumberland	11.698.753	149.517.754
Nottingham	8.764.196	118.747.235
Salop	792.907	10.333.138
Somerset	1.063.541	17.490.070
Stafford	14.454.709	181.110.469
Warwick	3.004.810	39.780.212
Westmoreland	955	14.224
Worcester	819.830	9.325.448
York	28.702.690	361.817.419
Totaux	161.874.608	2.115.564.845

Digitized by Google

COMTÉS	QUANTITÉS	VALEUR sur les EXPLOITATIONS
Pays de Galles.	tonnes	francs
Brecon	447.733	5.991.919
Carmarthen	1.355.141	17.888.975
Derbigh	2.486.246	35.486.507
Flint	673.123	9.607.584
Glamorgan	28.129.746	425.868.753
Pembroke	48.910	728.455
Totaux	33.140.899	495.572.193
Écosse.		
Argyll et Dumfries	158.078	1.994.675
Ayr	4.107.189	51.825.637
Clackmannan	431.491	5.890.963
Dumbarton	544.557	7.603.553
Edinburgh	1.350.767	18.441.419
Fife	5.506.083	75.172.119
Haddington	472.191	6.446.610
Kinross	39.382	537.665
Lanark	17.449.137	238.224.968
Linlithgow	1.203.037	16.424.550
Peebles	660	9.004
Renfrew	13.314	156.969
Stirling	2.359.839	32.557.734
Sutherland	6.274	85.647
Totaux	33.641.999	455.371.513
Irlande.		
Connaught	9.914	122.879
Leinster	80.749	1.000.526
Munster	13.474	166.988
Ulster	22.557	279.527
Totaux	126.694	1.569.920
Totaux généraux	(*) 228.784.200	3.068.078.471

(*) Y compris 11.315 tonnes de houille, d'une valeur de 81.385 francs, qui ont été tirées de carrières.

(*Extrait du* General Report and Statistics relating to the Mines and Quarries, in the United Kingdom of Great Britain and Ireland, 3e partie.)

Digitized by Google

DIMINUTION DES RISQUES D'ACCIDENTS

DANS LES

HOUILLÈRES FRANÇAISES DEPUIS 1833

Par M. Octave KELLER, Inspecteur général des Mines.

Je me propose de montrer, aussi brièvement que possible, les progrès considérables qui ont été réalisés depuis une cinquantaine d'années dans les houillères françaises, au point de vue des accidents.

Je ne parlerai pas des autres mines, de celles où l'on exploite les minerais de fer, le sel gemme, les autres minerais de toutes sortes, parce qu'elles sont beaucoup moins développées, qu'elles occupent un personnel relativement restreint, et surtout parce qu'elles sont demeurées dans un état sensiblement stationnaire sous le rapport de la sécurité des mineurs.

Les chiffres dont je ferai usage sont empruntés à la *Statistique de l'industrie minérale*, publication officielle du Ministère des Travaux publics, dont l'origine remonte à l'année 1833. C'est seulement à partir de 1850 que cette *Statistique* contient un état annuel où sont résumés les accidents arrivés dans les mines, minières, carrières, par département (sauf pour les années 1851, 1852 et 1859). Des renseignements analogues ont toutefois été publiés pour les années 1842 et 1844, d'une façon sommaire, dans le *Rapport* du ministre placé en tête des tableaux statistiques. Il semblait, à cette époque, peu intéressant d'entrer à ce sujet dans de longues énumérations, et l'on se contentait de fournir les nombres des accidents et des

Digitized by Google

victimes relevés dans les diverses exploitations pour certaines années citées à titre d'exemple. Postérieurement, grâce à des recherches laborieuses exécutées dans les Archives du Ministère des Travaux publics, il a été possible de reconstituer les éléments principaux de la statistique des accidents des houillères depuis 1833. Quelques lacunes subsistent cependant, par suite du défaut de renseignements touchant les accidents autres que ceux dus aux explosions de grisou ; elles concernent les années 1841, 1843, 1845 à 1849, 1851, 1852 et 1859.

Somme toute, la statistique officielle des accidents survenus dans les houillères françaises embrasse une période assez longue pour servir à une étude fructueuse : elle ne comprend pas moins de cinquante-six années.

Dans les tableaux annuels se trouvent indiqués, par département et par nature de mine, le nombre des ouvriers employés à l'intérieur, à l'extérieur, le nombre des accidents, avec la mention de leur cause, celui des tués et celui des blessés.

Toutefois il convient — et c'est une remarque essentielle — de ne pas mettre sur le même rang la statistique des ouvriers tués et celle des ouvriers blessés. La première offre de sérieuses garanties d'exactitude, par sa nature même. Au contraire, la seconde présente un caractère indécis, en ce sens qu'elle comprend seulement, en principe, les mineurs atteints de blessures graves et que les ingénieurs des mines, chargés des enquêtes, aussi bien que les exploitants, ont eu à apprécier, jusqu'en ces derniers temps, non sans difficulté, ce qu'il faut considérer comme blessure grave.

En effet, le décret impérial du 3 janvier 1813, contenant des dispositions de police relatives à l'exploitation des mines, ne vise, en son article 11, que les accidents « qui auraient occasionné la mort ou des *blessures graves* à un ou plusieurs ouvriers » comme devant être portés

Digitized by Google

aussitôt par les exploitants, directeurs, maîtres-mineurs et autres préposés, à la connaissance du maire de la commune et de l'ingénieur des mines. La loi du 8 juillet 1890, par laquelle ont été institués les délégués à la sécurité des ouvriers mineurs, a prescrit l'envoi immédiat au délégué de l'avis des mêmes accidents.

C'est seulement depuis l'application de la loi du 9 avril 1898 sur les accidents du travail dans l'industrie en général que la statistique des blessés peut être établie d'une façon précise : pour les mines, aux termes d'une circulaire du 11 juillet 1899, concertée entre le Ministre des Travaux publics et celui du Commerce et de l'Industrie, doivent être considérées comme *blessures graves* celles qui entraînent une incapacité de travail permanente, absolue ou partielle, et celles qui occasionnent une incapacité de travail temporaire d'au moins vingt jours.

En fait, les statistiques annuelles n'ont tenu compte jusqu'à présent que des blessures donnant lieu à des chômages prolongés, mais sans qu'il y eût à cet égard de règle bien établie. Ainsi, pour ne citer que deux exemples, en 1873 le nombre des blessés constaté dans les houillères était de 7 fois celui des tués, et les journées de chômage par ouvrier blessé étaient en moyenne de quarante-cinq. L'année suivante, le rapport des blessés aux tués était de 8,7 et le chômage moyen s'abaissait à trente-neuf journées. L'indication des journées de repos occasionnées par les blessures à l'ensemble des ouvriers blessés, indication que contenaient les tableaux, a conséquemment été supprimée, à partir de 1875, en raison de son peu d'utilité.

D'autre part, en 1888, l'Administration des Mines, incitée par les projets de loi dont le Parlement se trouvait saisi en vue d'indemniser les victimes des accidents du travail, a procédé à une enquête spéciale dans le but de rechercher le nombre total des blessés atteints soit

Digitized by Google

gravement, soit d'une façon plus ou moins légère, pendant les trois années 1885, 1886 et 1887. J'en ai fourni le compte rendu dans le volume de la *Statistique de l'industrie minérale et des appareils à vapeur pour l'année* 1887 ; et je l'ai commenté dans mon *Rapport sur la Statistique des accidents du travail* présenté au premier Congrès international concernant cet objet, qui s'est réuni à Paris en 1889. Je me borne à rappeler que, d'après les renseignements qui ont été fournis par les 80 Compagnies houillères les plus importantes pour les trois années sus-indiquées, les victimes se classaient en moyenne comme il suit, par 10.000 ouvriers (y compris les employés) :

Tués	17
Invalides affectés d'une incapacité de travail permanente.	9
Blessés grièvement ayant chômé plus de 6 mois	11
— — de 3 à 6 mois	23
Blessés ayant chômé de 21 jours à 3 mois	313
Blessés légèrement, ayant chômé de 5 à 20 jours	1007
Blessés très légèrement, ayant chômé 4 jours au plus	385

Le nombre des blessés, en laissant de côté ceux qui n'ont pas éprouvé une incapacité de travail supérieure à vingt jours, ressort à 356 pour 17 tués, soit 21 blessés pour 1 tué. Si l'on prend le total général des blessés, qui est de 1.748 par 10.000 personnes, d'après les chiffres ci-dessus, la proportion dépasse 100 blessés pour 1 tué.

On obtient, comme on voit, des chiffres très différents suivant le compte que l'on tient du degré de gravité des blessures ; et, à cet égard, toute statistique complète comporte nécessairement plusieurs divisions : on s'exposerait à des erreurs graves si l'on n'établissait pas un classement d'après l'ordre d'importance des conséquences des accidents.

Les détails dans lesquels je viens d'entrer font comprendre pourquoi, dans la présente étude, je laisse com-

Digitized by Google

plètement de côté la statistique des blessés pour ne m'occuper que de celle des accidents mortels. Cette dernière est résumée dans le tableau suivant, depuis 1833, en éliminant la période 1841 à 1849, qui contient trop de lacunes.

Ce tableau fournit, année par année, la proportion des morts par rapport au nombre des mineurs employés, tant à la surface qu'au fond, dans les houillères françaises, y compris les mines de lignite. C'est par 10.000 ouvriers que le calcul est établi, et non par 100 ou par 1.000, pour la commodité de la lecture, afin d'éviter l'emploi de plusieurs décimales.

Les moyennes sont données pour les six périodes considérées, dont les quatre dernières embrassent chacune dix ans.

TABLEAU N° 1. — *Nombre annuel des ouvriers mineurs tués par accident sur* 10.000 *ouvriers employés.*

ANNÉES	TUÉS	ANNÉES	TUÉS	ANNÉES	TUÉS	ANNÉES	TUÉS	ANNÉES	TUÉS	ANNÉES	TUÉS
»	»	1850	38,5	1861	43,2	1871	30,7	1881	16,4	1891	16,7
»	»	»	»	1862	22,6	1872	23,2	1882	14,2	1892	9,5
1833	44,7	1853	38,4	1863	26,6	1873	22,2	1883	15,2	1893	9,3
1834	37,6	1854	42,4	1864	24,3	1874	20,3	1884	15,6	1894	8,5
1835	30,8	1855	38,1	1865	32,0	1875	20,6	1885	16,8	1895	11,9
1836	37,8	1856	33,9	1866	26,2	1876	36,6	1886	13,0	1896	13,0
1837	35,8	1857	30,2	1867	36,2	1877	21,6	18 7	17,3	1897	10,7
1838	41,9	1858	28,9	1868	25,6	1878	14,4	1888	17,7	1898	10,7
1839	50,0	1859	»	1869	32,6	1879	16,0	1889	30,1	1899	13,5
1840	47,2	1860	27,3	1870	28,7	1880	17,5	1890	25,8	1900	14,2
Moyennes.	40,7		34,7		29,8		22,3		18,2		11,8

Les nombres qui précèdent montrent d'une façon évidente la décroissance des accidents mortels, qui est absolument remarquable. De 40,7 pour la première période (1833 à 1840), la proportion moyenne des ouvriers tués est descendue à 11,8 pour la période la plus récente (1891 à 1900). La diminution révélée par les moyennes est continue. Elle ne peut conséquemment être attribuée à des circonstances fortuites ; et il est clair *a priori* qu'elle

Digitized by Google

résulte des améliorations apportées aux conditions de l'exploitation des houillères sous le rapport de la sécurité, comme on le montrera plus loin.

Un diagramme, qui a été publié dans la *Statistique de l'industrie minérale* pour 1900, met en lumière le même résultat. On y voit figurés non seulement le nombre annuel des morts par 10.000 ouvriers, mais encore, et séparément au moyen de bandes noires, le contingent mortuaire des accidents de grisou. On constate immédiatement, en y jetant les yeux, que les accidents de ce dernier genre font un nombre de victimes extrêmement variable suivant les années, et qu'ils sont la principale cause des fluctuations importantes que révèle la statistique, quant à la proportion annuelle des ouvriers tués.

Tandis que les autres accidents ne sont communément que des accidents individuels et font rarement plus de 2 à 3 victimes d'un seul coup, les explosions de grisou occasionnent parfois la mort d'un grand nombre de mineurs et prennent le caractère de véritables catastrophes.

C'est ainsi qu'on a compté, en 1896, 191 ouvriers tués par le grisou, dont 186 à la suite de l'explosion survenue dans la mine de Terrenoire, au puits Jabin (Loire), et, en 1889, 225, dont 207 au puits Verpilleux de la concession de Méons (Loire).

Par contre, quelques années, trop rares, n'ont donné lieu à aucun accident mortel de ce genre, savoir :

1841, 1843, et, après un intervalle de quarante-huit ans, les trois années successives : 1892, 1893, 1894 et l'année 1898.

La dernière période décennale est tout à fait remarquable ; en mettant à part l'année 1891, où le grisou a fait 65 victimes, on n'en compte que 24 en tout pour les neuf années suivantes.

Ce résultat doit être attribué principalement aux mesures prises en vue d'assurer la sécurité dans les

Digitized by Google

mines grisouteuses, en particulier à l'amélioration constante de l'aérage, à l'emploi des explosifs de sûreté pour le tirage des coups de mine, à la diffusion des lampes à treillis métallique, à la surveillance de plus en plus étroite du grisou.

Il est d'autant plus caractéristique que l'extraction de la houille et le nombre des mineurs n'ont cessé d'augmenter, et cela dans d'énormes proportions, comme le montrent les chiffres ci-dessous (nombres arrondis) :

ANNÉES	PRODUCTION HOUILLÈRE	NOMBRE DES OUVRIERS
1833	2.058.000 tonnes	15.400
1840	3.003.000 —	27.800
1850	4.434.000 —	32.900
1860	8.304.000 —	59.200
1870	13.330.000 —	82.700
1880	19.362.000 —	107.200
1890	26.083.000 —	121.600
1900	33.404.000 —	162.100

Autrefois 15 à 20 p. 100 des mineurs qui étaient victimes d'accidents mortels succombaient au grisou, ainsi qu'il ressort des moyennes établies sur des périodes d'une certaine étendue. Dans la dernière période décennale, cette proportion est tombée un peu au-dessous de 5 p. 100.

Bien plus, le risque individuel de mort par le grisou n'a été, de 1891 à 1900, que la huitième partie de ce qu'il était moyennement au cours des précédentes années.

Le tableau suivant met en évidence cette importante constatation.

Il fait en même temps connaître le nombre moyen des victimes et leur répartition en les rapportant à un effectif fixe de 10.000 ouvriers (fond et jour réunis), d'après les causes d'accidents les plus fréquentes pour les deux groupes d'années allant de 1850 à 1870, où l'on a les

Digitized by Google

renseignements détaillés nécessaires, et pour les trois périodes décennales consécutives.

TABLEAU N° 2. — *Proportion des ouvriers tués, d'après les causes des accidents, pour les ouvriers du fond et du jour réunis.*

ANNÉES ET PÉRIODES	NOMBRE annuel moyen des ouvriers du fond et du jour réunis	NOMBRE annuel moyen des ouvriers tués	PROPORTION DES OUVRIERS TUÉS PAR 10.000 OUVRIERS du fond et du jour réunis							
			Eboulements	Grisou	Coups de Mine	Puits		Exploitation des voies ferrées souterraines	Causes autres que celles ci-devant mentionnées	Totaux
						Rupture des câbles, chaînes, engins, etc.	Chutes, depuis la surface, etc.			
1850 — 1853 — 1857 (3 ans)	44,229	154	16,05	4,97	1,28	2,64	6,95	»	2,93	34,82
1863 — 1865 à 1870 (7 ans)	82,026	244	10,61	6,58	0,68	2,50	4,15	»	5,23	29,75
1871 à 1880 (10 ans)	103,680	230	7,43	4,94	0,69	1,54	3,28	»	4,30	22,18
1881 à 1890 (10 ans)	108,167	198	5,18	5,95	0,30	0,55	1,69	1,35	3,28	18,30
1891 à 1900 (10 ans)	141,773	168	4,13	0,65	0,39	0,21	1,59	1,61	3,26	11,84

Les risques d'accidents sont bien plus considérables pour le personnel employé à l'intérieur des mines que pour celui de la surface. Il est possible d'en établir la statistique d'une façon distincte. Toutefois on est contraint de laisser de côté les accidents dus à des causes diverses qui sont survenus dans les périodes 1863 à 1870 et 1871 à 1880, et dont les victimes comprennent malheureusement, dans les statistiques, des ouvriers du fond et des ouvriers du jour sans distinction. On forme dans ces conditions le tableau suivant, qui diffère du précédent par le relèvement général des coefficients de risques, abstraction faite des causes diverses.

Digitized by Google

TABLEAU N° 3. — *Proportion des ouvriers tués, d'après les causes des accidents, pour les ouvriers du fond.*

ANNÉES ET PÉRIODES	NOMBRE annuel moyen des ouvriers du fond	NOMBRE annuel moyen des ouvriers tués	PROPORTION DES OUVRIERS DU FOND TUÉS PAR 10.000 OUVRIERS DU FOND							
			Eboulements	Grisou	Coups de mine	Puits		Exploitation des voies ferrées souterraines	Causes diverses au fond	Totaux
						Rupture de câbles, chaînes, engins, etc.	Chutes, depuis la surface, etc.			
1850 — 1853 — 1857 (3 ans)	32,254	154	21,99	6,81	1,75	3,62	9,52	»	4,01	47,70
1863 — 1865 à 1870 (7 ans)	58,608	?	14,75	9,15	0,95	3,48	5,77	»	?	»
1871 à 1880 (10 ans)	73,798	?	10,40	6,92	0,97	2,16	4,59	»	?	»
1881 à 1890 (10 ans)	77,255	183	7,25	8,33	0,42	0,77	2,37	1,86	2,69	23,69
1891 à 1900 (10 ans)	101,011	143,6	5,81	0,88	0,56	0,29	2,23	2,26	2,19	14,22

Les conclusions suivantes ressortent des chiffres consignés dans ces tableaux :

1° Les éboulements, qui sont la cause la plus fréquente des accidents, ont considérablement diminué. La proportion correspondante des mineurs tués n'est plus guère que le quart de ce qu'elle était vers 1850. Sous ce rapport, les progrès de la sécurité sont continus. Ils sont évidemment dus aux mesures de plus en plus complètes qu'ont prises les exploitants pour boiser les galeries et pour étançonner les chantiers partout où il est nécessaire. D'autre part, dans les houillères du Centre en particulier, les méthodes d'exploitation avec remblais se sont généralisées et ont eu pour conséquence de restreindre les éboulements, d'en atténuer les dangers.

2° Pour les accidents de grisou, la situation est demeurée sensiblement stationnaire de 1850 à 1890. Mais, depuis lors, elle s'est améliorée au-delà de tout ce qu'il

Digitized by Google

était permis d'espérer. Comme il a été déjà dit, la proportion des morts n'est presque plus que la huitième partie de ce qu'elle était précédemment.

Il serait téméraire d'affirmer que le progrès est définitif; il peut survenir encore, dans plus d'une houillère, quelque terrible explosion de grisou faisant d'un seul coup un grand nombre de victimes. Le coefficient de risque correspondant actuellement donné par la *Statistique* serait, en pareil cas, fortement relevé. Mais il est permis d'espérer qu'il s'abaissera, au contraire.

L'Administration des Mines a, en effet, imposé, depuis un certain nombre d'années, aux exploitants des mines à grisou un ensemble de mesures de plus en plus précises en vue de prévenir les explosions. Ces mesures concernent la ventilation des galeries et des chantiers, le jaugeage régulièrement fait du courant d'air et le dosage du grisou, l'éclairage au moyen de lampes de sûreté, le remblaiement des galeries abandonnées, les précautions à prendre pour l'allumage des coups de mine, enfin et surtout l'emploi exclusif, dans les mines à grisou, des explosifs détonants à basse température, dont l'invention est, pour quelques-uns, relativement récente. Ces explosifs sont caractérisés par l'absence de tout élément combustible, tel que hydrogène, oxyde de carbone, carbone solide, dans les produits de leur détonation; leur température de détonation, calculée d'après les formules chimiques de leurs substances constitutives et les quantités de chaleur dégagées, ne doit pas être supérieure à 1.900° C. pour les explosifs employés aux percements de rocher, ni à 1.500° pour ceux employés dans les travaux en couche.

L'énumération de ces mesures se trouve dans le Règlement-type sur la police des mines qui a été élaboré, en même temps qu'un projet de décret portant règlement pour la police des mines, par une Commission spéciale

Digitized by Google

instituée, en 1893, par le Ministre des Travaux publics, et dont l'application a été recommandée aux ingénieurs, partout où les conditions de l'exploitation le justifieront, par une circulaire ministérielle du 25 juillet 1895.

Les prescriptions à observer concernent les objets suivants :

Travaux à ciel ouvert (clôtures, parapets) ;

Puits et galeries débouchant au jour et puits intérieurs (dispositions générales, échelles, circulation par les câbles) ;

Plans inclinés ;

Roulage en galeries ;

Machines d'extraction ; câbles ;

Aérage et éclairage ;

Travail au chantier ;

Plans et registres ;

Explosifs ;

Mesures spéciales aux mines à grisou (aérage et dispositions générales, éclairage, explosifs) ;

Mesures spéciales à des cas particuliers ;

Dispositions diverses.

Je ne puis que signaler ici, sans entrer dans plus de détails, ce règlement-type, qui ne comprend pas moins de 140 articles rédigés en vue de prévenir les accidents de toute sorte dont les mines sont le théâtre.

Son but a été de généraliser, en les unifiant, des prescriptions qui, pour la plupart, étaient déjà en vigueur dans nombre d'exploitations. L'extension progressive de ces mesures de sécurité explique la diminution correspondante des risques d'accidents non seulement par le grisou, mais encore par les coups de mine, par les ruptures de câbles, les chutes dans les puits et les autres accidents dont il me reste à commenter la statistique.

3° Les dangers des coups de mine sont relativement faibles dans les houillères : la proportion des morts, pour

Digitized by Google

cette cause, s'est réduite de plus des deux tiers. Toutefois la diminution des accidents de ce genre, dans lesquels l'inexpérience des ouvriers joue un rôle prépondérant, n'a pas été régulière; et l'on constate leur recrudescence dans la période de 1891 à 1900. L'emploi des mèches dites de sûreté, les précautions prises avant de les allumer, l'interdiction de revenir sur les coups ratés, ont puissamment contribué à restreindre les accidents occasionnés par les coups de mine.

4° Les accidents survenus dans les puits accusent une forte diminution. Ils donnaient lieu, toutes causes réunies, à 13,14 tués par 10.000 ouvriers du fond pendant les années 1850, 1853, 1857, et seulement à 2,52 tués pendant la période 1891 à 1900. La réduction finale est de plus des quatre cinquièmes.

Les dangers se sont surtout atténués en ce qui concerne la rupture des câbles, chaînes, engins, catégorie d'accidents dans laquelle la statistique comprend les chutes de tonnes, d'objets, etc... Les chutes des personnes, soit depuis la surface, soit à des niveaux quelconques dans les puits, qui forment la seconde catégorie, sont aussi devenues beaucoup plus rares.

Les améliorations réalisées en vue de la sécurité ont principalement consisté dans l'emploi des cages pour la descente et la remonte du personnel, dans celui des parachutes, dans les essais de résistance, la vérification journalière et le renouvellement plus fréquent des câbles, dans l'adaptation de freins puissants aux machines d'extraction, dans la pose de barrières aux abords des puits et des recettes, dans la fermeture automatique de ces barrières, sans parler d'une série d'autres mesures préventives qui sont énumérées dans le règlement-type.

5° Les autres accidents sont dus à l'asphyxie par des gaz délétères autres que l'hydrogène carboné, notam-

Digitized by Google

ment par l'acide carbonique, aux inondations, à des causes diverses.

Ceux qui se sont produits dans le roulage, du fait de l'exploitation des voies ferrées souterraines, figurent séparément dans une colonne du tableau pour les deux dernières périodes. Cette distinction a paru motivée par le développement de plus en plus grand de ces voies ferrées et par l'accroissement corrélatif des dangers auxquels est exposé le personnel employé au roulage souterrain. Pour les années antérieures, les accidents de cette nature rentrent dans ceux de l'avant-dernière colonne du tableau n° 2.

Cette colonne comprend les ouvriers tués *à la surface*, sauf pour les années 1850, 1853, 1857, où le renseignement fait défaut. Sans cette lacune, dans le tableau donnant la proportion des ouvriers tués par 10.000 ouvriers du fond et du jour réunis, le nombre 2,93 serait remplacé par un nombre plus élevé, et il en serait de même pour le total correspondant des ouvriers tués.

Pendant les deux dernières périodes décennales, les accidents de surface ont été relevés d'une façon distincte par les ingénieurs chargés d'établir la statistique, tandis qu'ils étaient confondus auparavant avec les accidents souterrains dus à des causes diverses. Le nombre moyen des ouvriers tués sur le carreau des mines, par 10.000 ouvriers du jour, a été de 5,05 de 1881 à 1890 et de 5,98 de 1891 à 1900. Ces nombres s'abaissent à 1,5 et à 1,7 respectivement, si l'on rapporte les morts à 10.000 ouvriers du fond et du jour réunis. D'après cela, au nombre 2,93 dont il vient d'être question, il serait logique de substituer environ 4,6.

D'autre part, en additionnant les nombres inscrits dans les deux avant-dernières colonnes du même tableau, on trouve 4,63 pour l'avant-dernière période décennale et 4,97 pour la dernière.

Digitized by Google

On voit que les risques de mort afférents aux causes diverses, y compris le roulage souterrain et les accidents à la surface, ne se sont pas sensiblement modifiés.

Finalement, dans l'intervalle des cinq périodes considérées, c'est-à-dire en l'espace d'une quarantaine d'années, *la mortalité moyenne par accident*, dans les houillères françaises, *s'est abaissée dans une proportion voisine de celle de* 3 *à* 1.

Ici trouve place une observation de principe. On est tenté, par une pente naturelle de l'esprit et à l'imitation des statisticiens anglais, de chercher le rapport qui existe entre le nombre des mineurs tués et la quantité correspondante de houille extraite annuellement. En comparant de cette façon l'année 1850, où il y a eu 122 ouvriers tués, et l'année 1900, où l'on en a compté 230, on trouve que, pour 1 mort, on a extrait environ 36.300 tonnes de charbon en 1850 et 145.200 tonnes, soit quatre fois plus, en 1900. Mais cette méthode ne me paraît pas recommandable pour l'étude des risques d'accident. Elle a, en effet, l'inconvénient d'introduire dans la question un nouvel élément, le rendement annuel de l'ouvrier; et ce rendement dépend de la constitution des gisements, de l'épaisseur des couches de charbon, des conditions dans lesquelles se fait l'exploitation. Conséquemment les résultats des calculs ne sont nullement comparables d'un bassin à un autre, d'un pays à un autre.

En particulier, une statistique internationale des accidents ne saurait avoir pour base rationnelle le montant de la production houillère substitué au nombre des ouvriers employés dans les mines.

Qu'il me soit permis de rappeler, en terminant, une indication générale, déduite des statistiques françaises et étrangères, que je donnais dans mon Rapport présenté au premier Congrès international des accidents du travail,

Digitized by Google

en 1889. En traitant des *éléments du prix de l'assurance*, je concluais comme il suit :

« Si l'on considère un nombre fixe d'ouvriers exerçant la même profession, à condition que ce nombre soit considérable (100.000 par exemple), on constate une surprenante régularité dans le nombre des accidents qui atteignent ces ouvriers, chaque année, et dans celui des victimes, des tués et des blessés. Sans doute, il se manifeste des écarts, d'une année à la précédente ; mais les variations que révèlent les statistiques, lorsque celles-ci sont exactes, sont, en général, d'ordre secondaire.

« Il résulte de là que les accidents, lors même qu'ils semblent dus au pur hasard, sont régis par des lois mystérieuses. Ils se produisent annuellement avec une fréquence en quelque sorte fatale. C'est sur la fréquence des accidents de même espèce que sont basées, comme chacun sait, les assurances. Le principe de la *constance des risques* pour une organisation déterminée du travail, dans chaque branche de l'activité humaine, constitue la base fondamentale des études théoriques relatives aux accidents.

« Toutefois les *lois du hasard* ne sont pas absolument inflexibles. Dans toutes les industries où l'on s'applique à prévenir les dangers, où de bienfaisantes inventions se répandent, où de salutaires prescriptions se multiplient en vue de mieux assurer la sécurité des personnes, on voit les risques diminuer. L'emploi des lampes à treillis métalliques et des ventilateurs dans les houillères infestées de grisou, celui des signaux de protection, des freins automoteurs, des appareils d'enclenchement sur les chemins de fer, des soupapes de sûreté adaptées aux chaudières à vapeur, des dispositifs si variés propres à mettre les ouvriers à l'abri des outils et des organes de transmission des machines en mouvement dans les établissements industriels de toute sorte, se traduisent dans les statistiques, surtout dans les statistiques décennales, d'une

Digitized by Google

façon souvent obscure, indistincte quant aux causes, mais très apparente quant aux effets, par une *diminution périodique de la proportion des victimes.* »

L'intéressante et précieuse statistique des accidents mortels survenus dans les houillères françaises depuis 1833 justifie pleinement cette conclusion.

Paris, 10 avril 1902.

Digitized by Google

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE GÉOLOGIQUE

DES

GITES MINÉRAUX DE LA NORMANDIE

Par M. René MASSE, Ingénieur civil des Mines,
Ancien élève de l'École Polytechnique.

L'étude géologique des terrains normands m'a dernièrement conduit à des hypothèses et à des conclusions que mes travaux postérieurs m'ont permis de vérifier et de compléter. J'ai cru devoir — sur le conseil de mes anciens maîtres — les résumer dans une note qui, peut-être, intéressera les lecteurs des *Annales des Mines*.

J'ai adopté pour cette note le plan qui m'a paru le plus logique et le plus simple ; il peut se résumer ainsi :

I. — Que savait-on sur la géologie du Calvados et quelles conclusions pratiques en avait-on tirées au sujet des gisements minéraux et notamment du fer ?

II. — Quels éléments nouveaux les recherches entreprises et les travaux faits ont-ils apportés ?

III. — Comment s'en trouvent modifiées ou confirmées les susdites conclusions ?

I

La basse Normandie et, en particulier, le Calvados sont situés sur le bord ouest d'un vaste bassin qui couvre, en même temps qu'une partie de l'Angleterre, la plus grande partie du Nord et du Nord-Ouest de la France et qui s'étend des terrains primitifs du Bocage normand à ceux de la Lorraine.

Digitized by Google

La symétrie des roches qui forment les rivages de ce bassin est bien connue. Peut-être y aurait-il lieu, se servant des analogies vraisemblables eu égard à cette disposition, d'étudier le facies normand en se souvenant des indications recueillies dans la partie Est du bassin? Mais c'est là une question qui ne rentre pas dans le cadre de cette note.

Aussi cette Normandie, où presque tous les âges géologiques se trouvent représentés, a-t-elle été depuis déjà longtemps un vaste champ d'études pour les géologues, et de nombreux travaux de recherches y furent-ils poussés. Signalons, à cet égard, les recherches de houille faites au commencement du siècle dernier vers Bayeux et dans la Manche, malheureusement sans résultats bien appréciables.

Ces recherches étaient rendues particulièrement séduisantes par l'existence du minerai de fer dans toute la région; la coexistence de ces deux sources de richesses aurait à ce point transformé le pays et accru le domaine industriel de la France qu'on conçoit les efforts qui ont été faits dans ce sens.

Le minerai de fer, lui, était au contraire bien connu et les difficultés de transport, la non-utilisation sur place, ont seules empêché, je pense, qu'il soit plus activement recherché et exploité.

De Caumont, dans son *Essai sur la Topographie géognostique du département du Calvados*, *1825*, signale la présence du minerai de fer dans le silurien normand, à Urville, à la Ferrière-aux-Étangs, à Saint-Martin-des-Besaces, à Orbigny, etc.

« En ces points, dit-il, l'ancien grès rouge, « grès « armoricain », se charge tellement d'oxyde de fer qu'il forme des roches de minerai brun ou rouge. »

Blavier, dans ses *Études géologiques sur le département de l'Orne*, *1842*, le signale de même dans les termes

Digitized by Google

suivants, qui ne laissent aucun doute sur la nature silurienne des gisements ni sur leurs emplacements :

« Il est une autre roche qui, en plusieurs endroits du département, accompagne ce grès quartzeux (grès armoricain) et nous semble lié à sa formation; c'est une couche de fer oxydé rouge ou brun qui existe au contact avec le quartz grenu dans la forêt de Saint-Clair d'Hallouze, à la Ferrière-aux-Étangs et au Chatelier, trois communes de l'arrondissement de Domfront. »

Harlé, dans son *Aperçu de la constitution géologique du Calvados*, *1853*, signale de même la présence du minerai à Urville et reconnaît la discordance du cambrien et du silurien.

Beaucoup plus récemment, M. l'Ingénieur en chef Le Cornu, dans ses nombreuses et remarquables études sur *le Silurien des Vallées de l'Orne et de l'Odon*, *de la Brèche-au Diable*, *de Falaise*, *etc.*, *etc.* (*1887 à 1891*), signale la présence du minerai à Urville, à Saint-Germain-le-Vasson, à Jurques, à Bény-le-Bocage, etc. ; il décrit en détail le gisement de Saint-Rémy; enfin, entrant plus avant dans la question, il reconnait l'isoclinal de May-Saint-André, signale le synclinal de Perrières, les deux synclinaux et l'anticlinal de Falaise.

*
* *

Des recherches, des études, dont je n'ai pu indiquer ici et très rapidement que les principales, résultait la certitude d'un gisement de fer dans le silurien normand, gisement paraissant situé au contact des grès armoricains du mur, et dont l'allure — identique à celle des roches encaissantes — participait des plissements dont M. Le Cornu esquisse, dans une des notes précitées, la théorie provisoire et le schéma.

Voilà quel fut le point de départ de mes travaux, dont

Digitized by Google

le but était d'étudier le synclinal de Perrières et d'y retrouver, vers l'Est, la couche d'Urville et de Saint-Germain-le-Vasson.

Seuls quelques affleurements de grès indiquaient l'allure générale du synclinal par les traces discontinues, tantôt du toit, tantôt du mur, des schistes à Calymènes que nous avons reconnu, par la suite, être contemporains de la formation ferrugineuse. Tout le bassin était recouvert par des terrains jurassiques dont l'épaisseur variait de 5 à 30 mètres environ ; enfin, un niveau hydrostatique mal connu venait compliquer la question.

C'est dans ces conditions, et après de nombreuses et minutieuses visites sur le terrain, que furent entrepris, dès avril 1900, les travaux de recherches dont je vais maintenant indiquer rapidement la nature et les résultats.

II

M. Le Cornu a décrit le synclinal de Perrières :

« Les formations siluriennes (grès armoricains S^1, schistes à Calymènes S^2 et grès de May S^3) reposent en discordance sur les formations cambriennes, le tout recouvert par les formations jurassiques. Deux vallées, celles de la Laize et du Laizon, mettent à nu les formations siluriennes et dévoilent même l'existence, dans la vallée de la Laize, d'une couche de minerai de fer. »

Ajoutons de suite que ce minerai affleure aussi dans la vallée du Laizon, à la Brèche-au-Diable, où l'on voit un petit affleurement d'hématite brune.

Précisons la forme de ce synclinal ; représentons-le par l'affleurement des terrains anciens sous le jurassique supposé enlevé. En suivant l'affleurement des grès armoricains, en en notant la direction et le pendage et en prenant la moyenne d'un grand nombre de mesures, nous avons pu établir le tracé représenté par la *fig.* 1.

Digitized by Google

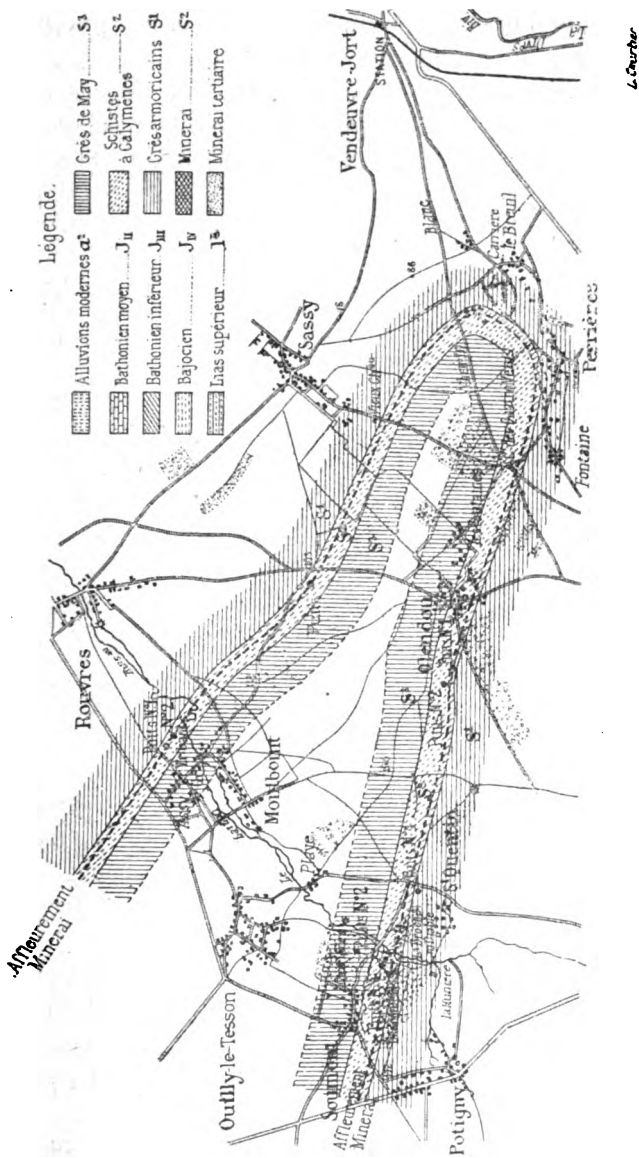


Fig. 1. — Synclinal de Perrières (le jurassique supposé enlevé).

Digitized by Google

Nous voyons que, vers l'Est, l'affleurement présente deux points d'inflexion (l'un vers Sassy, l'autre vers Olendon) et un point anguleux vers Perrières.

Dans l'ensemble, en faisant abstraction de ces trois points particuliers, nous constatons : que le pendage du relèvement Nord est très élevé et qu'il varie de 80 à 95°, que celui du relèvement Sud est moindre et compris entre 35 et 50°.

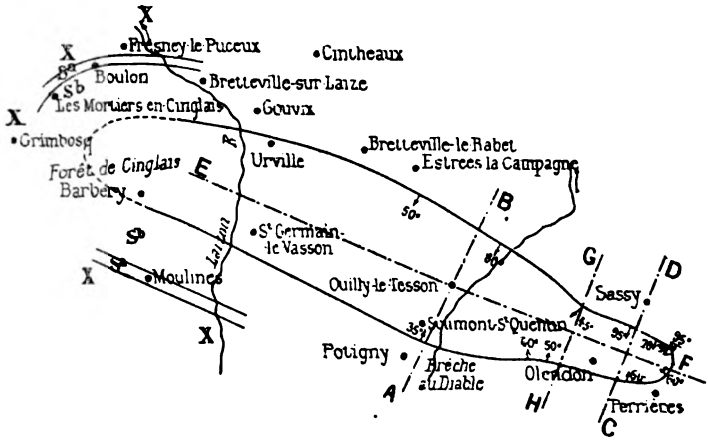


Fig. 2.

Faisons des coupes telles que celles indiquées par AB, CD, EF, GH sur la *fig.* 2. Si nous traçons les coupes transversales du pli d'après les pendages et le sentiment de la continuité, nous avons les coupes ci-jointes (*fig.* 3) tracées en admettant une allure en fond de bateau.

Remarquons que la flèche serait alors de 1.200 mètres environ vers Ouilly-le-Tesson, de 650 mètres sur les communes de Sassy et d'Olendon, et que la coupe longitudinale EF doit présenter un point d'inflexion, tout comme les traces d'affleurement.

Notons aussi que rien ne prouve que nous ayons en pro-

Digitized by Google

fondeur cette allure en fond de bateau et qu'il se peut que nous ayons une allure en plateure avec, par conséquent, des flèches beaucoup moindres.

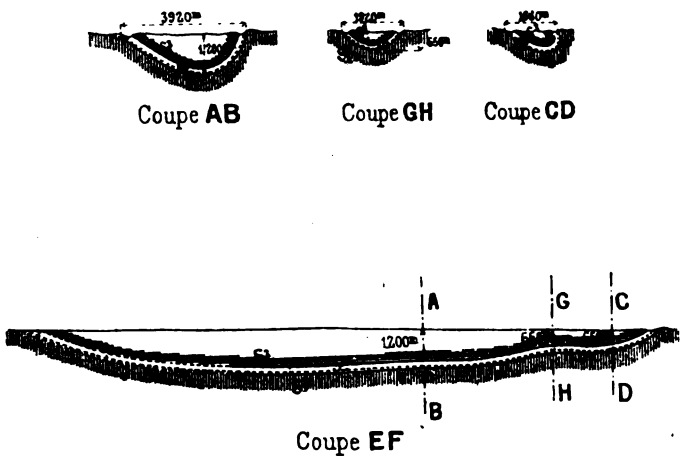


Fig. 3.

Ainsi à l'Est le synclinal se termine, se ferme, par l'affleurement des grès armoricains, ces grès changeant peu à peu de direction, tournant toujours d'une façon continue, jamais brusquement, sauf naturellement au point anguleux de Perrières.

L'extrémité Ouest du synclinal est moins nette, perdue qu'elle est dans la forêt de Cinglais.

Nous pensons pourtant qu'il doit se terminer comme à l'Est, ou, du moins, d'une façon analogue, et qu'il ne s'arrête pas brusquement.

En effet, si nous considérons (*fig.* 2) les couches au mur des grès armoricains (les schistes verts et pourprés S^a, les conglomérats pourprés S^b et même les phyllades X), nous constatons que ces couches, à partir de Bretteville-sur-Laize, changent peu à peu de direction, passent au Sud de Fresnay-le-Puceux, à Boulon, à Saint-Laurent-du-Coudel

Digitized by Google

et ont complètement tourné aux Moutiers-en-Cinglais ; qu'elles affleurent, en somme, comme à Perrières, les grès armoricains.

Par suite, ces mêmes grès peuvent très bien, quoique cachés par les assises de l'oolithe inférieure (bajocien) et le diluvium de la forêt de Cinglais, avoir, vers l'Ouest, l'allure des couches sous-jacentes et tourner après Outre-Laize pour venir rejoindre les grès affleurants à Barbery.

*
* *

TRAVAUX DE RECHERCHES.

Nos recherches ont eu lieu sur la partie Est du synclinal. Elles ont été faites en cinq points :

Deux sur le relèvement Nord ; deux sur le relèvement Sud ; une à l'extrémité même du synclinal, soit, pour préciser :

1° Au hameau d'Assy, sur la commune d'Ouilly-le-Tesson ;

2° Au lieu dit les Feugles, sur la commune de Sassy ;

3° Vers la Brèche-au-Diable, sur la commune de Soumont-Saint-Quentin ;

4° Près du village d'Olendon ;

5° Au hameau du Breuil, sur la commune de Perrières.

*
* *

1° Nos travaux comprenaient au hameau d'Assy un travers-bancs de 57 mètres placé sur la rive gauche du Laizon (Voir les coupes, *fig.* 4 et 5).

Ce travers-bancs rencontre d'abord un petit dépôt de minerai d'alluvion, puis du calcaire du bathonien moyen ;

Digitized by Google

il atteint ensuite les terrains primaires représentés par la

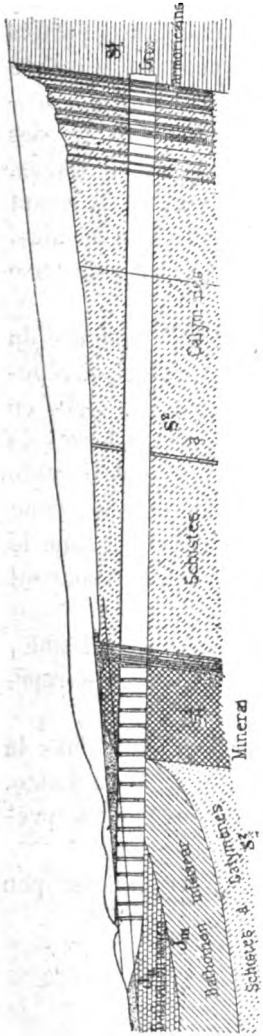


Fig. 4. — Travers-bancs d'Assy.

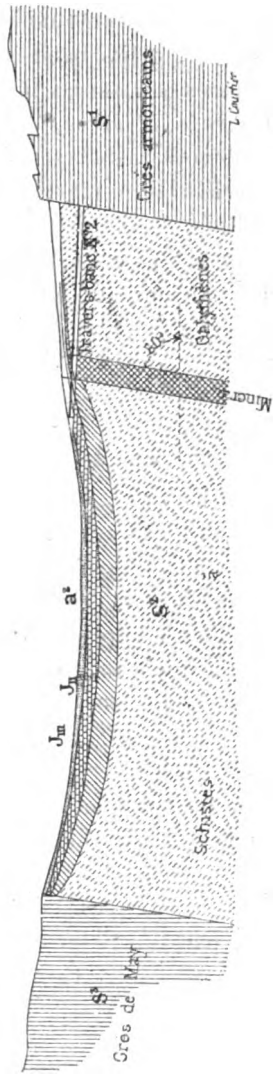


Fig. 5. — Coupe par la fouille d'Assy.

couche de minerai, dont le pendage est ici de 80°. Cette

Digitized by Google

couche de minerai a $6^m,10$ de puissance et est formée d'hématite rouge.

Au mur se trouvent quelques petits bancs de grès alternant avec de petits bancs d'argile blanche, rouge parfois et par places seulement. Ensuite le travers-bancs trouve des schistes à Calymènes présentant, jusqu'aux grès à Bilobites, différents aspects : ce sont des argiles blanches, des argiles schisteuses plus ou moins dures, grises, rouges, noires. Enfin, apparaissent des bancs d'argile diminuant de plus en plus, lorsqu'on approche des grès armoricains.

Le mur du minerai se trouve à 39 mètres en puissance du toit des grès armoricains.

Il y a lieu de faire ici une remarque : à l'ouverture du travers-bancs, sous une faible couche d'argile très irrégulière, se trouve un dépôt d'alluvion argileux et riche en morceaux de minerai. Ce dépôt se trouve au-dessus du bathonien moyen ; nous y avons trouvé des morceaux de calcaire contenant des Rhynchonelles ; ce dépôt est donc postérieur au jurassique et peut être considéré comme le résultat de l'érosion du minerai silurien, érosion pouvant avoir eu lieu à l'époque tertiaire.

Ce même dépôt se retrouve aussi à la Brèche-au-Diable, mais alors inclus entre des argiles d'alluvion, argiles reposant sur les schistes à Calymènes.

Outre le minerai primaire, il existe donc bien, dans la vallée du Laizon, comme d'ailleurs dans celle de la Laize, des dépôts de minerai tertiaire qui semblent avoir le premier comme origine.

Ajoutons que ces dépôts, argileux, irréguliers, peu étendus, paraissent inexploitables.

*
* *

2° Sur *Sassy*, au lieu dit les Feugles, un puits de 18 mètres a traversé le bathonien moyen, le bathonien

Digitized by Google

inférieur et un banc sableux représentant ici le bajocien ; il a trouvé alors l'affleurement du minerai et une nappe d'eau (*fig.* 6).

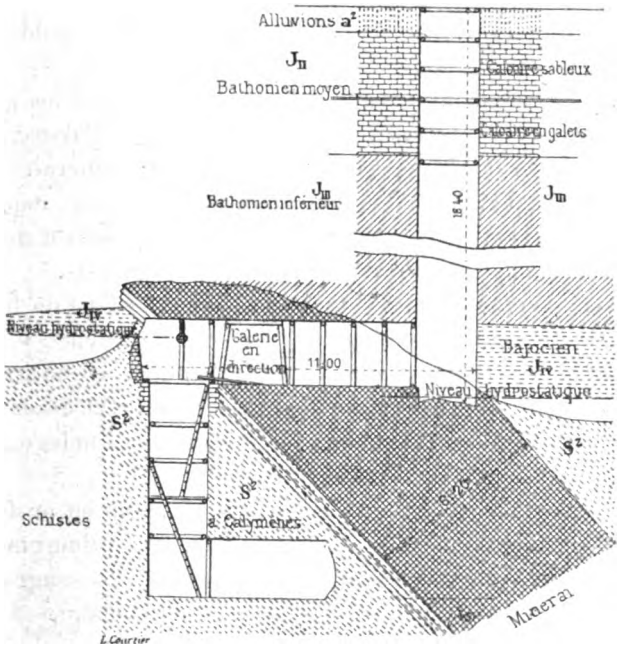


Fig. 6. — Coupe des travaux de Feugles.

Un travers-bancs reconnut ensuite la couche de 6 mètres de puissance formée d'hématite rouge et d'un peu de limonite.

Au mur du minerai existent encore les petits bancs de grès et d'argile alternés.

Nous avons en ce point continué les travaux en vue d'une étude des niveaux hydrostatiques.

Ici, au toit du minerai, se trouvent des calcaires, et la nappe d'eau est à 18 mètres ; au mur se trouvent des argiles.

Digitized by Google

Un travers-bancs amorcé un peu au-dessus de ce niveau fut poussé horizontalement dans ces argiles ; de l'eau ne tarda pas à suinter, ce qui permit de conclure à l'existence d'une autre nappe d'eau, à un niveau un peu supérieur à celui de la précédente, ce que des sondages confirmèrent.

Il y aurait donc ici, entre les grès de May et les grès armoricains, et reposant sur les schistes à Calymènes, deux nappes d'eau séparées par la crête du minerai. Cela existe ici ; mais, en d'autres points, ces deux nappes peuvent être réunies en une seule, tout dépendant de la plus ou moins grande proéminence de cette crête.

Pour compléter cette étude, nous avons foncé un bure de 7 mètres de profondeur au mur de la couche ; il fut suivi par un travers-bancs devant la recouper. L'eau arriva bientôt par des fissures par les plans de stratification des argiles schisteuses et, enfin, jaillit dans un sondage fait au front de taille et atteignant le minerai.

Il sera donc nécessaire, pour l'exploitation en profondeur, de laisser une certaine épaisseur de l'affleurement de minerai pour éviter autant que possible le passage par filtration des nappes d'eau à l'intérieur de la mine.

*
* *

3° A *Soumont-Saint-Quentin*, nos travaux utiles ont comporté (*fig.* 7, 8, 9) : une descenderie sur la rive gauche du Laizon nous donnant des indications sur le contact des schistes à Calymènes avec les grès à Bilobites. Il y a là de petits bancs alternés de grès et d'argile, qui identifient nettement les contacts de ces deux formations sur les deux relèvements Nord et Sud (Voir Pl. XIII) ;

Un puits traversant la couche de minerai et la recoupant à 12 mètres de profondeur (*fig.* 8).

Le minerai formé d'hématite rouge et brune et de

Digitized by Google

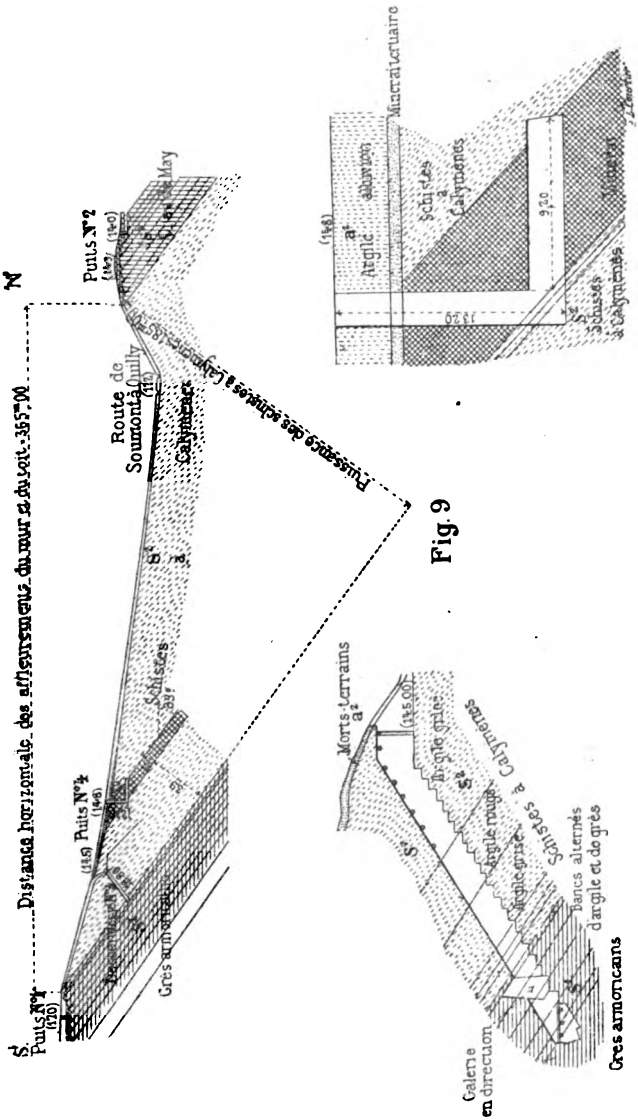


Fig. 7 à 9. — Travaux et coupes de Soumont-Saint-Quentin.

Digitized by Google

limonite est assez argileux à cet affleurement ; il a aussi 6 mètres de puissance, et, au mur, on retrouve les petits bancs de grès et d'argile alternés. La distance du mur de minerai au toit des grès armoricains est de 40 mètres environ.

*
* *

4° A *Olendon* (*fig.* 10), un puits de 25 mètres a rencontré les calcaires du bathonien moyen et inférieur. A cette profondeur on trouve le niveau hydrostatique.

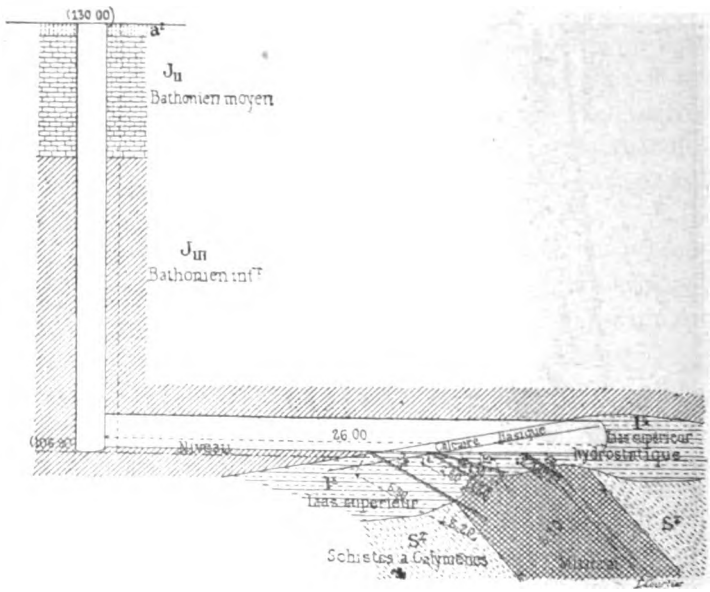


Fig. 10. — Coupe des travaux d'Olendon.

Un travers-bancs horizontal, au-dessus de la nappe d'eau, poussé d'abord dans le bathonien moyen, trouve ensuite des bancs montant peu à peu, puis arrive aux calcaires et aux argiles liasiques à *Hildoceras bifrons*.

Digitized by Google

Dans cette région, les grès armoricains semblent être recouverts par une vingtaine de mètres de bathonien, les grès de May affleurent à peine. Les couches jurassiques ne sont pas absolument horizontales, le plissement hercynien a affecté principalement le primaire; mais les mouvements postérieurs qui en furent la continuation atténuée (affaissements, resserrements, etc.) affectèrent aussi le jurassique, de sorte qu'il forme des plis avec des synclinaux et des anticlinaux, il est vrai peu prononcés, mais existant réellement.

Outre ces plis, il en existe d'autres. Nos travaux d'Assy et de Perrières nous ont permis de constater le fait suivant : les couches de calcaire, qui se relèvent un peu en arrivant au contact des grès armoricains, se relèvent aussi au contact de la couche de minerai et forment un petit anticlinal. Le minerai, plus résistant que les argiles qui l'encaissent, semble avoir fait crête sous l'assise jurassique.

Ce petit anticlinal jurassique peut même se suivre à la surface du sol, si l'on fait abstraction des vallées actuelles, c'est-à-dire ici de tout ce qui pourrait être dû à une érosion postérieure aux dépôts jurassiques. En résumé, le secondaire est plissé; ses plissements suivent les plissements du silurien et, en outre, un léger anticlinal caractérise la crête du minerai et peut se suivre presque partout.

Ces considérations nous ont guidé et, lorsque le travers-bancs, commencé dans des bancs calcaires légèrement plongeants vers le Nord, les a trouvés d'abord horizontaux, puis relevés et laissant apparaître un anticlinal de lias, six sondages furent faits : quatre atteignirent l'affleurement du minerai, qui se trouva ainsi défini (*fig.* 10).

Digitized by Google

5° A *Perrières*, au hameau du Breuil, les travaux exécutés (*fig.* 11 et 12) comprenaient :

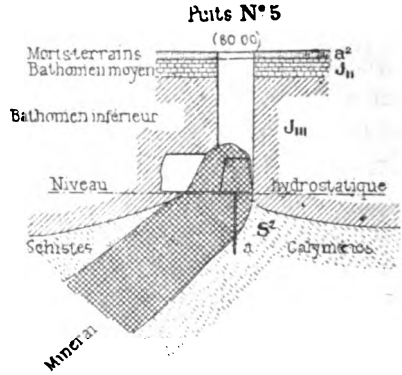


Fig. 11. — Coupe du puits du Breuil.

Une descenderie et divers puits qui nous ont donné la position exacte du toit des grès armoricains ;

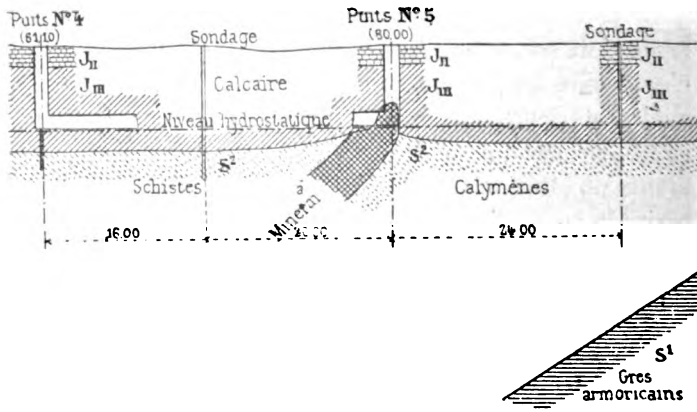


Fig. 12. — Coupe des travaux du Breuil.

Un puits traversant les calcaires du bathonien et atteignant le niveau hydrostatique ; un sondage qui reconnut les schistes à Calymènes.

Digitized by Google

Ces travaux avaient été effectués avec les premières données qui nous faisaient chercher le minerai au contact des grès armoricains.

Un nouveau puits tombant sur les grès armoricains nous permit de déterminer le point anguleux de Perrières. La variation brusque de direction est de 35° ; le pendage sur le relèvement Nord est voisin de 90° ; sur le relèvement Est, il est de 35°.

Nos travaux en ce point ont, dès lors, été déplacés un peu au Sud, où des sondages et des puits nous donnèrent un affleurement de minerai malheureusement presque totalement couvert par les eaux.

III

Voyons maintenant quelles conclusions ou quelles présomptions se peuvent déduire des faits précédemment exposés. Et, tout d'abord, résumons-les brièvement.

Une coupe N. 20° E. par nos travaux de la Brèche-au-Diable et d'Assy (Pl. XIII), et une autre par nos travaux d'Olendon et de Sassy (Pl. XIII), montrent l'identité des dépôts sur les relèvements Nord et Sud du synclinal.

Nos travaux ont donc défini une couche de minerai composée principalement d'hématite rouge avec un peu d'hématite brune et de limonite, ces deux derniers corps pouvant être considérés comme une transformation de l'hématite rouge par les agents atmosphériques et semblant devoir disparaître en profondeur.

Il est vrai qu'en profondeur l'hématite rouge peut disparaître aussi et être remplacée — comme à la Ferrière — par du carbonate. Je ne crois cependant pas qu'il en soit ainsi à l'extrémité Est du synclinal; et je pense plutôt que, comme à Saint-Rémy et pour les mêmes raisons, nous aurons là de l'hématite en profondeur. L'avenir nous fixera sur ce point.

Digitized by Google

Cette couche s'étendrait dans le synclinal de Perrières et formerait une cuvette de près de 20 kilomètres de longueur, de 4 kilomètres de largeur, et dont le fond pourrait atteindre une profondeur de 1.200 mètres environ.

Retenons, en outre, que cette couche de minerai est intercalée dans les schistes à Calymènes, qu'elle se trouve à environ 40 mètres des grès armoricains et, enfin, que les schistes à Calymènes (autant que les travaux effectués permettent d'en juger) ne semblent pas se présenter ici, comme à Saint-Rémy, à May, etc., sous forme de schistes durs, mais sous forme d'argiles diversement colorées, devenant schisteuses par places et notamment dans le voisinage des grès à Bilobites.

*
* *

Le silurien normand forme de longs bassins étroits dont la direction est à peu près parallèle à la direction armoricaine N. 110° E.

Des coupes N. 20° E. normales à cette direction et passant l'une par Falaise et l'autre par Caen (Pl. XIV et XV) montrent la superposition des terrains primitifs, primaires et secondaires, en Normandie, particulièrement dans le Calvados. On voit que les dépôts jurassiques se sont disposés en transgression sur le primaire et qu'ils plongent dans l'ensemble vers le N.N.E.

Ces coupes indiquent, en outre, la situation relative des diverses cuvettes siluriennes : de May, de Perrières, de Falaise et de la Ferrière-aux-Étangs.

Cette situation est mise en lumière plus complètement encore par les coupes N.S. (*fig.* 13, 14, 15, 16), faites par 3°, 2° 90, 2° 80 et 2° 70 de longitude Ouest.

Toutes ces coupes permettent de relier entre eux les différents plis siluriens, de préjuger leur allure générale et, par conséquent, de prévoir le prolongement —

Digitized by Google

sous les terrains les plus récents — des synclinaux

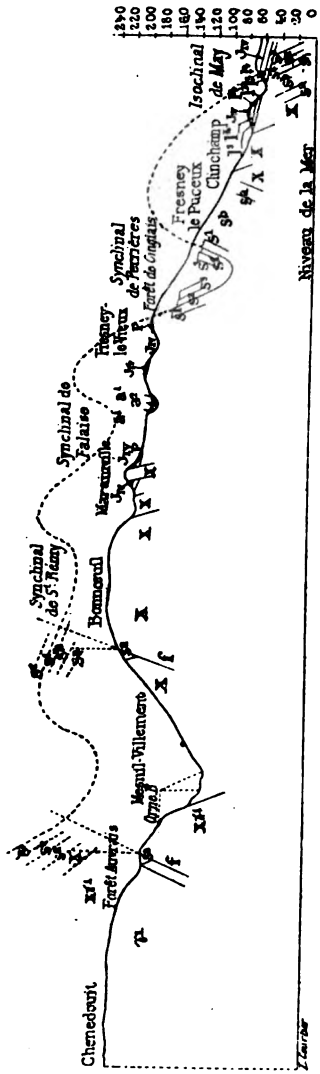


Fig. 13. — Coupe N.S. par 3° longitude Ouest.

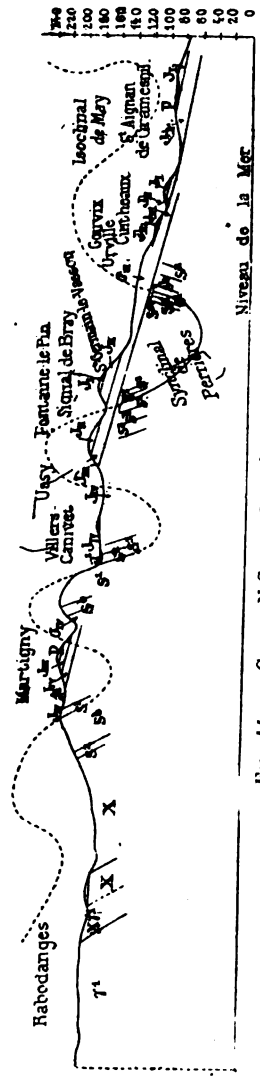


Fig. 14. — Coupe N.S. par 2° 90' longitude Ouest.

actuellement connus.

Digitized by Google

L'examen attentif de ces coupes et les constatations

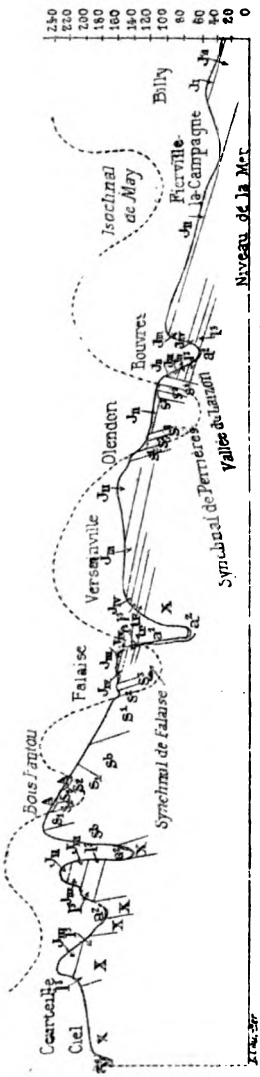


FIG. 15. — Coupe N.S. par 2° 80' longitude Ouest.

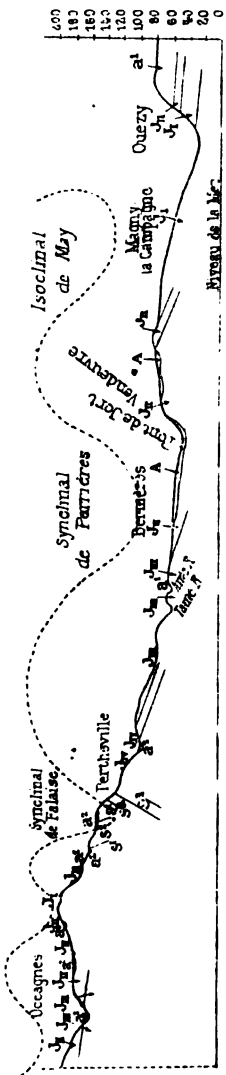


FIG. 16. — Coupe N.S. par 2° 70' longitude Ouest.

locales nous ont conduit à un certain nombre de conclu-

Digitized by Google

sions que nous allons signaler en remarquant tout d'abord que la profondeur des plis semble augmenter du Sud au Nord, ce qui concorde bien avec la transgression des terrains secondaires observés plus haut.

*
* *

A May, la partie renversée de l'isoclinal (Pl. XV) est moins puissante que la fraction correspondante de la partie Sud. C'est un fait sur lequel tout le monde est d'accord : les explications qui en sont données diffèrent seules. Quant à nous, nous nous demandons s'il n'y aurait pas là simplement un laminage des couches dû au plissement ; ce fait n'est pas rare dans les plis alpins et amène même parfois la suppression des couches.

Comme nous l'avons dit déjà pour le synclinal de Perrières, nous pensons que l'isoclinal de May se ferme aussi à l'Est, vers Fontenay-le-Marmion : on constate, en effet, que les schistes verts et pourprés tournent en ce point, donnant ainsi l'indication d'une allure qui peut bien être aussi celle des grès siluriens.

Dans le massif de Falaise, on constate l'existence de deux synclinaux séparés par un anticlinal. Ces formations siluriennes partent de Villedieu-lès-Bailleul et s'étendent à l'Ouest, en passant par Falaise, Saint-Rémy, Coutances, etc.

Nous nous expliquons la forme extérieure apparente d'un pareil massif par le simple jeu des érosions. Considérons, en effet, un ensemble formé de deux synclinaux et d'un anticlinal (*fig.* 17), allure que nous rencontrons d'ailleurs, en pratique, vers Falaise et à Saint-Rémy (Pl. XIV et XV), et, supposant à cet ensemble l'aspect primitif de la *fig.* 17, voyons celui que lui peuvent donner les érosions suivant leur importance et leur direction.

Si nous admettons que les érosions aient enlevé tout ce

Digitized by Google

qui est au-dessus de la ligne ZZ′, nous avons exactement la coupe de Falaise (Voir Pl. XIV).

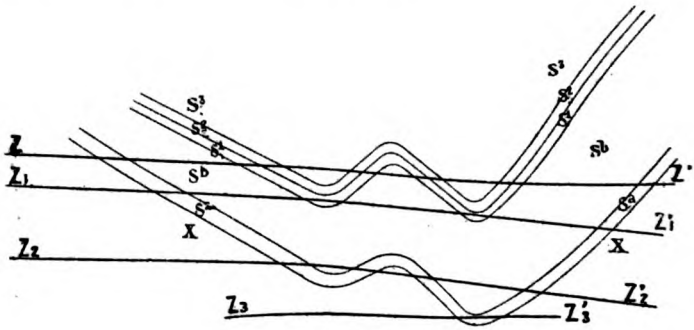


Fig. 17.

Si nous admettons que les érosions ont enlevé tout ce qui est au-dessus de $Z_1 Z'_1$, nous avons la coupe de Pontécoulant-Saint-Bénin (*fig.* 18 et 19).

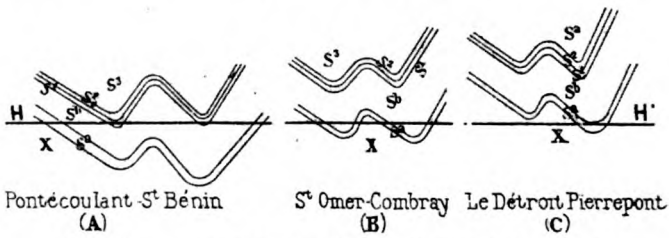
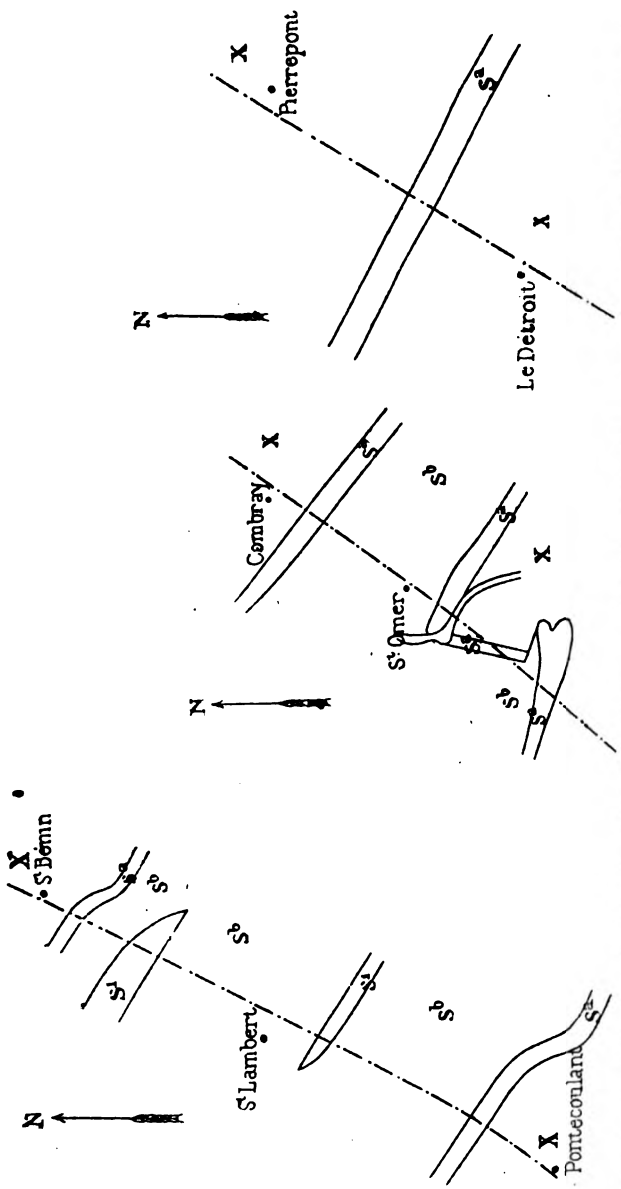


Fig. 18. — Plans d'érosion hypothétiques de la *fig.* 17.

De même, les érosions schématiquement représentées par $(Z_2Z'_2)$ et $(Z_3Z'_3)$ nous donnent les coupes par Saint-Omer-Combray, par le Détroit-Pierrepont (*fig.* 18 et 19).

Supposons donc un pli dont le profil en direction soit tel que les coupes par Pontécoulant, Saint-Omer, le Détroit, soient les coupes A, B, C de la *fig.* 18, et admettons une érosion se produisant suivant un plan horizontal HH′. On aura comme résultats, après l'érosion, justement les

Digitized by Google



A'. — Coupe par Pontécoulant Saint-Bénin. B'. — Coupe par Saint-Omer-Cambray. C'. — Coupe par le Détroit-Pierrepont.

FIG. 19. — Extraits de la Carte géologique de Falaise.

Digitized by Google

aspects que l'on constate actuellement aux trois points considérés et que résume la *fig.* 19 (extraits de la carte géologique au 1/80.000, feuille de Falaise).

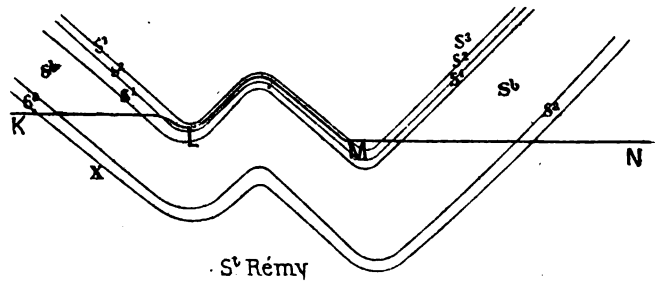


Fig. 20.

Si donc on tient compte de ce fait que les érosions se sont produites (et se produisent encore) suivant des directions éminemment variables d'un point à un autre, on pourra expliquer ainsi un aspect géologique quelconque ; par exemple, la ligne d'érosion KLMN nous donnera exactement l'aspect de Saint-Rémy (*fig.* 20), qui serait

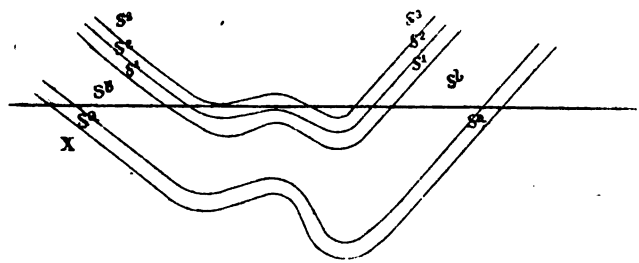


Fig. 21.

d'ailleurs expliqué de même par l'hypothèse d'une érosion horizontale s'exerçant sur un pli ayant en cette région le profil de la *fig.* 21.

Les choses ont-elles pu se passer ainsi dans la réalité des faits ? Je n'hésite pas à le penser, car, d'une part,

Digitized by Google

l'aspect des plis, leur allure, changent tout le long de leur direction et, d'autre part, les érosions se produisent, selon les points, suivant des zones différentes, si bien qu'on pourra toujours, en un point déterminé, reconstituer pour le ou les plis une forme telle que, soumise à une érosion déterminée, elle ait laissé comme résultat une succession connue et constatée de terrains.

Ainsi s'expliqueraient aisément une grande partie des aspects actuellement constatés en Normandie sans qu'il soit besoin d'avoir recours aux multiples failles directes, dont l'emploi est si commode qu'on peut craindre d'être tenté de les faire trop facilement et trop souvent intervenir : les phénomènes naturels, en dehors de certains cataclysmes, ont généralement, au contraire, une certaine continuité.

Je ne dis pas — notons-le bien — que la théorie que je présente puisse et doive tout expliquer. Je suis d'autant moins exclusif à cet égard que c'est justement à l'emploi quasi exclusif des failles directes que je crois devoir faire quelques objections.

En somme, je veux dire seulement qu'en dehors des failles directes (il y en a bien certainement, et quelques-unes sont évidentes) d'autres causes peuvent expliquer les aspects géologiques actuels.

*
* *

Quelle idée peut-on se faire maintenant de la formation des bassins siluriens normands ?

On sait d'abord qu'au-dessus des roches primitives et du cambrien déjà plissés sont venus se déposer les assises siluriennes proprement dites, de sorte qu'il n'est pas surprenant de voir les grès à Bilobites reposer en discordance soit sur les schistes verts et pourprés (ce qui est

Digitized by Google

le cas général), soit — plus rarement — sur les conglomérats pourprés, les phyllades ou même les granites.

Ainsi, à Falaise même, les grès armoricains reposent sur les phyllades; à la Ferté-Macé, sur les granites, et cela suivant que les érosions post-cambriennes ont attaqué plus ou moins profondément les plis des terrains antérieurs.

Nos travaux semblent permettre de préciser maintenant le mode de formation des terrains siluriens proprement dits.

Remarquons en effet qu'à May, à Saint-Rémy, la couche de minerai, dont la puissance varie de 2 mètres à $2^m,50$, se trouve au contact direct des grès armoricains et que, parfois, on observe entre ce minerai et les grès du mur quelques mètres d'argile schisteuse.

Remarquons, de plus, que, dans le synclinal de Perrières, le minerai dont la puissance atteint 6 mètres est séparé des grès armoricains par environ 40 mètres d'argile schisteuse (S_2).

Remarquons, enfin, que la puissance absolue des schistes à Calymènes, qui varie de 50 à 100 mètres à May, à Saint-Rémy..., atteint 180 mètres dans le synclinal de Perrières.

On en peut conclure que le sous-sol cambrien s'est affaissé lentement pendant les dépôts siluriens, formant une sorte de fond de bateau, dont la partie basse aurait occupé l'emplacement actuel du synclinal de Perrières (*fig.* schématique 22).

On peut donc admettre l'explication suivante :

Les formations primitives et cambriennes, déjà légèrement plissées par les plis calédoniens, qui avaient surtout affecté l'Écosse, ont émergé et ont été plus ou moins érodées. Après quoi, un affaissement a amené les eaux siluriennes sur ces terrains et, cet affaissement s'étant continué, tout en s'atténuant pendant les premiers dépôts siluriens, ceux-ci ont pris l'allure que nous constatons

Digitized by Google

aujourd'hui. A cet affaissement (précurseur ordinaire des plissements) a succédé le plissement hercynien, qui fit émerger les anticlinaux actuels, qui — par la suite — s'érodèrent plus ou moins pendant que les synclinaux se comblaient, grâce aux apports dévoniens, puis carboni-

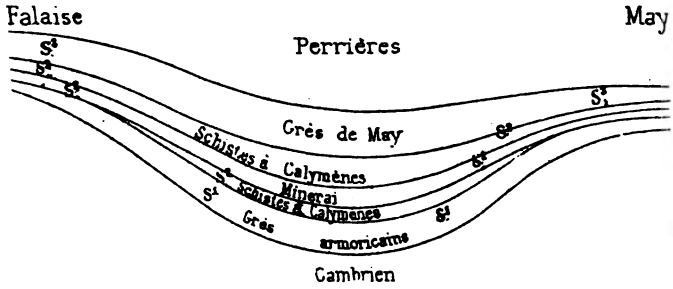


Fig. 22.

fères. Un soulèvement postérieur permit enfin à une érosion active de donner au silurien l'aspect qu'il a aujourd'hui. Un nouvel affaissement du silurien a permis les dépôts secondaires, qui forment l'extrémité S.-O. du bassin parisien et vont en digressant sur le primaire vers le N.-E. Ces couches secondaires ont ensuite été légèrement plissées par un resserrement des plis hercyniens.

De cette compréhension de la formation silurienne en Normandie, du principe de continuité, de l'approfondissement des synclinaux vers le Nord, on peut tirer quelques conclusions dont on peut espérer la vérification ultérieure, grâce aux recherches qui seront faites dans l'avenir.

Il existe vraisemblablement au Nord et à l'Est de Perrières d'autres synclinaux siluriens. Ces synclinaux doivent contenir aussi du minerai de fer contemporain des schistes à Calymènes; il est possible, enfin, que, dans certains d'entre eux, le carbonifère ait été plus ou moins respecté par les érosions, mais sans qu'on puisse dire sous quelle forme il se présentera.

Digitized by Google

*
* *

Tel qu'il est, ce travail est bien incomplet et sans doute bien imparfait : je m'en veux excuser, tenant toutefois à faire hommage du peu qu'il vaut aux hommes éminents, maîtres ou devanciers, dont les enseignements ou les travaux m'ont tracé la voie et mis à même de la poursuivre utilement, — heureux surtout si j'ai pu fournir quelques renseignements dont d'autres plus autorisés sauront sans doute tirer les véritables et ultimes conclusions(*).

(*) J'adresse ici mes remerciements à M. Kimmerlé, ingénieur civil des Mines, qui, tout en surveillant nos travaux, m'a aidé à réunir les matériaux de cette étude.

Digitized by Google

RECHERCHES

SUR LES

ACIERS AU NICKEL A HAUTES TENEURS

Par M. L. DUMAS, Ingénieur des Arts et Manufactures,
Ingénieur-Conseil, Ancien Chef du Service métallurgique de la Société
de Commentry-Fourchambault et Decazeville.

NOTE ADDITIONNELLE.

Ayant été amené à faire sur les aciers de nouvelles expériences par immersion dans l'air liquide, il nous paraît intéressant, comme complément à ce que nous avons dit précédemment (*), de rendre compte des effets produits par cette immersion sur les propriétés mécaniques des aciers qui subissent la transformation réversible à une température inférieure à la température ordinaire, et la transformation irréversible à une température inférieure à celle de la neige carbonique ou très voisine de cette température.

Nous avons pu faire cette constatation sur les échantillons des coulées (71) et (76). Quatre éprouvettes, prélevées dans la même barre, ont été essayées à la traction ; deux d'entre elles ont été trempées à 900°. Une éprouvette non trempée et une éprouvette trempée de chaque coulée ont été immergées dans l'air liquide. Le tableau XIII *bis* donne comparativement les résultats obtenus.

(*) Voir *supra*, p. 126.

Digitized by Google

TABLEAU XIII *bis*.

DÉSIGNATION des échantillons	TENEURS en nickel	TRAITEMENTS subis par les échantillons		RÉSULTATS DES ESSAIS A LA TRACTION			
				Limites d'élasticité par mm. carré	Résistances à la rupture par mm. carré	Allongements p. 100 à la rupture	Strictions $\frac{S-s}{S} \times 100$
				kil.	kil.		
(71)	28.82	non trempé.	non refroidi.....	29,8	52,5	30	70,7
			refroidi à — 188°.	63	88,3	12	52
		trempé.....	non refroidi.....	18,3	46,9	41	33,6
			refroidi à — 188°.	71,9	98,4	12	52
(76)	30.44	non trempé.	non refroidi.....	35	54,5	30	70,7
			refroidi à — 188°.	87	98,4	11,2	50
		trempé.....	non refroidi.....	24.9	49,8	38	74,3
			refroidi à — 188°.	80	98	13	49

Ces résultats démontrent que la transformation irréversible, qui se produit à très basse température dans les aciers à teneur en nickel assez élevée pour subir la transformation réversible au-dessus de la température ordinaire, a sur les propriétés mécaniques de ces aciers exactement la même influence que sur celles des aciers à teneur en nickel moindre. Elle transforme de même les aciers du type à basse limite d'élasticité en aciers du type à haute limite d'élasticité, en relevant la limite d'élasticité, augmentant la résistance à la rupture et réduisant l'allongement à la rupture et la striction.

On remarquera que l'influence de la trempe est presque complètement annulée par le refroidissement; les résultats des essais à la traction des échantillons refroidis dans l'air liquide sont presque identiques, qu'ils aient été trempés ou n'aient pas été trempés; ils sont, au contraire, très différents pour les échantillons non refroidis. Cette constatation est semblable à celles qui ont été faites sur des aciers à teneurs en nickel moins élevées.

Digitized by Google

BULLETIN.

LES SOURCES DE PÉTROLE DE L'ASIE CENTRALE.

L'attention a été attirée depuis quelque temps sur les sources de pétrole du district de Ferghana. Toute cette région est riche en couches de naphte, que signalent des émanations gazeuses plus ou moins fortes. L'huile minérale y est généralement accompagnée d'une masse noire bitumineuse qui peut être utilisée pour la production de l'asphalte et qui est déjà exploitée dans une mesure assez importante.

Les dépôts les plus riches se trouvent principalement dans le district d'Andidjan, le long de la rivière Malu-Sou, ainsi que dans celui de Marguelan (dépôts de Tchimione). Les premiers sont exploités depuis l'été de 1901 au moyen de forages à la vapeur. Les dépôts de Tchimione, situés à environ 27 kilomètres de la ville de Marguelan et à 20 kilomètres de Wannovskaïa, station du chemin de fer de l'Asie centrale, ont dû être exploités à une époque très reculée, car on y rencontre des vestiges de puits auxquels les indigènes attribuent une origine chinoise. Peu de temps après l'occupation du district de Ferghana, des puits de 20 à 25 mètres de profondeur et $1^{m},50$ de largeur furent pratiqués et produisirent une moyenne de 1.600 kilogrammes d'huile minérale par jour et par puits. Cette production, soumise à une distillation très primitive, fut employée à l'éclairage de la ville de Marguelan et à des usages domestiques. L'absence de moyens de transport et le manque de capitaux obligèrent les exploitants à s'arrêter, et vers 1880 les sources dont il s'agit tombèrent pour ainsi dire dans l'oubli. Mais depuis 1898 la construction du chemin de fer de Samarcande à Andidjan ramena dans ces régions sauvages un nouveau mouvement. Quelques ingénieurs du chemin de fer s'intéressèrent à cette question, et leurs essais furent couronnés de résultats si favorables qu'ils résolurent de tenter à nouveau l'extraction par des moyens mécaniques. Une Société au capital

Digitized by Google

de 250.000 roubles fut bientôt fondée; on acheta les appareils et machines nécessaires, on construisit des habitations ouvrières et, depuis le mois d'avril 1901, les travaux d'exploitation sont en bonne voie. Une conduite spéciale est également en construction pour relier les sources de naphte à la station de Wannovskaïa, où l'on projette de bâtir de grands dépôts. Les produits trouveront un débouché assuré dans le chemin de fer de l'Asie centrale et dans la ligne d'Orenbourg à Tachkent (en cours d'exécution), qui peuvent en consommer de grandes quantités comme combustible.

(*Extrait d'un* Rapport adressé à M. le Ministre des Affaires étrangères par M. Veillet-Dufrêche, *Consul Général de France à Moscou.*)

Digitized by Google

BIBLIOGRAPHIE.

PREMIER SEMESTRE DE 1902 (*).

OUVRAGES FRANÇAIS.

1° *Mathématiques et Mécanique pures.*

AILLOUD (A.). — Remarquables propriétés du nombre 142.857 (Exposé ; Démonstration ; Conclusion ; Généralisation ; Appendice). In-8°, 24 p. Chambéry, Perrin. (2)

APPELL (P.). — Cours de mécanique, à l'usage des candidats à l'École centrale des arts et manufactures. In-8°, 275 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars. 7f,50. (1563)

—— Traité de mécanique rationnelle. 2e édition, entièrement refondue. T. Ier : Statique ; Dynamique du point. In-8°, IX-602 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars. 18 fr. (5323)

BARBARIN (P.). — La Géométrie non euclidienne. In-8°, 79 p. avec fig. Chartres, impr. Durand. (*Scientia*. Physique mathématique. (2343)

BONNEL (J.-F.). — L'Atome dans la géométrie. In-8°, 7 p. Paris, Naud. (Extr. de *l'Enseignement mathématique.*) (5361)

CASALONGA (D.-A.). — Considérations sur les principes I et II de thermodynamique et sur le cycle de Carnot. In-8°, 7 p. Paris, Imp. nationale. (Extr. des *Comptes Rendus du Congrès des Sociétés savantes.*) (5374)

COULON (J.). — Sur l'intégration des équations aux dérivées partielles du second ordre par la méthode des caractéristiques (thèse). In-4°, 127 p. avec fig. Paris, Hermann. (5721)

(*) Les numéros qui figurent à la suite de chaque ouvrage sont ceux sous lesquels ces ouvrages sont respectivement inscrits dans la Bibliographie française et dans les Bibliographies étrangères.

Digitized by Google

FEHR (H.). — Les Extensions de la notion de nombre dans leur développement logique et historique. In-8°, 12 p. Paris, Naud. (Extr. de *l'Enseignement mathématique.*) (5432)

FREYCINET (C. de). — Sur les principes de la mécanique rationnelle. In-8°, VIII-170 p. Paris, Gauthier-Villars. (5439)

GOURSAT (E). — Cours d'analyse mathématique. T. Ier : Dérivées et Différentielles; Intégrales définies; Développements en séries; Applications géométriques. In-8°, VI-620 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars. 20 fr. (5452)

JOFFROY (J.). — Sur les heptagones et les ennéagones réguliers. In-8°, 3 p. Paris, Naud. (Extr. de *l'Enseignement mathématique.*) (5476)

NASCIUS (F.-C. de). — A la conquête du ciel ! Contributions astronomiques en quinze livres. Livre II. 2 fascicules in-8° avec fig. 5e fascicule : Découverte de la loi des distances des planètes au Soleil (Son interprétation géométrique), 71 p.; 6e fascicule et dernier : Découverte de la loi des distances des planètes au Soleil (Complément naturel, ou Principe des aires algorithmiques ou de l'invariabilité des grands axes des orbites), 88 p. Nantes, Dugas. (5545)

RIPERT (E.). — Sur une propriété des coniques. In-8°, 3 p. Paris, Naud. (Extr. de *l'Enseignement mathématique.*) (5598)

ROYER (Mme C.). — Une lettre à M. Laisant. In-8°, 8 p. Paris, Naud. (Extr. du même recueil.) (5607)

SIGARD (H.). — Traité de cinématique théorique. Avec des notes par *A. Labrousse*, professeur de mathématiques spéciales au lycée de Toulouse. In-8°, VIII-189 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars. (2294)

TANNERY (J.) et J. MOLK. — Éléments de la théorie des fonctions elliptiques. T. IV : Calcul intégral (deuxième partie); Applications. In-8°, IX-804 p. Paris, Gauthier-Villars. 9 fr. (5626)

ZEUTHEN (H.-G.). — Histoire des mathématiques dans l'antiquité et le moyen âge. Édition française, revue et corrigée par l'auteur, traduite par *Jean Mascart*, docteur ès sciences. In-8°, XIII-298 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars. 9 fr. (3829)

2° *Physique et Chimie.*

Analyse des eaux destinées à l'alimentation publique. Méthodes et Procédés employés par le laboratoire. In-8°, 47 p. Paris, 52, boulevard Montparnasse. (Laboratoire du Comité consultatif d'hygiène publique de France.) (355)

Digitized by Google

ARNAUD. — Sur la constitution chimique de l'acide tartrique. In-8°, 12 p. Paris, Impr. nationale. (Extr. du *Bull. du Muséum d'histoire naturelle.*) (5324)

BÉHAL (A.). — Traité de chimie organique, d'après les théories modernes. Précédé d'une préface de M. *Ch. Friedel*, membre de l'Institut. 2e édition, corrigée et très augmentée. T. II. In-8°, 1.028 p. avec fig. Paris, Doin. Les 2 vol., 32 fr. (3149)

BENOIST (L.). — Lois de transparence de la matière pour les rayons X. In-8°, 16 p. avec fig. Tours, impr. Deslis frères. (Extr. du *Journal de physique.*) (881)

BERTHELOT (D.). — Sur une propriété des gaz monoatomiques. In-8°, 3 p. Tours, impr. Deslis frères. (Extr. du même recueil.) (882)

BERTRAND (G.). — Exposition universelle internationale de 1900. Congrès international de chimie pure, tenu à Paris du 17 au 22 juillet 1900. Procès-verbaux sommaires. In-8°, 68 p. avec fig. Paris, Impr. nationale. (Ministère du commerce.) (3855)

CARVALLO (M.-E.). — L'Électricité déduite de l'expérience et ramenée au principe des travaux virtuels. Grand in-16, 91 p. avec fig. Chartres, impr. Durand. (*Scientia.* Physique mathématique.) (5989)

CROUZEL (E.). — Nouvelle méthode de dosage des principaux éléments actifs fertilisants du sol (chaux, acide phosphorique, azote, potasse). 2e édition. In-18 jésus, 24 p. Paris, Société d'éditions scientifiques et littéraires. (2937)

CULMANN (P.). — Nouveaux réfractomètres. In-8°, 16 p. avec fig. Tours, impr. Deslis frères. (Extr. du *Journal de physique.*) (920)

Deuxième Supplément au Dictionnaire de chimie pure et appliquée d'Ad. Würtz, publié sous la direction de *Ch. Friedel*, membre de l'Institut, professeur à la Faculté des sciences de Paris, avec la collaboration de MM. *P. Adam*, *A. Arnaud*, *A. Béhal*, *G. de Bechi*, *A. Bigot*, *L. Bourgeois*, *L. Bouveault*, *E. Burcker*, *C. Chabrié*, *P.-T. Clève*, *Ch. Cloëz*, *C. Combes*, *J. Dupont*, etc. T. V. Fascicule 43. In-8° à 2 col., p. 1 à 96, avec fig. Paris, Hachette et Cie. 2 fr. le fascicule. (2664)

DITTE (A.). — Introduction à l'étude des métaux. Leçons professées à la Faculté des sciences. In-8°, II-492 p. avec fig. Lille, Le Bigot frères. Paris, Société d'éditions scientifiques. 15 fr. (3600)

DUFET (H.). — Étude cristallographique et optique des sulfates de néodyme, de praséodyme et de samarium à 8 H^2O. In-8°, 35 p. avec fig. Tours, impr. Deslis frères. (Extr. du *Bull. de la Soc. française de minéralogie.*) (2415)

Digitized by Google

DUHEM (P.). — Thermodynamique et Chimie. Leçons élémentaires, à l'usage des chimistes. Grand in-8°, IX-496 p. avec fig. Paris, Hermann. (2416)

—— Le Mixte et la Combinaison chimique. Essai sur l'évolution d'une idée. In-8°, 214 p. Paris, Naud. (3918)

Encyclopédie chimique, publiée sous la direction de M. Fremy, membre de l'Institut. T. III : Métaux. 14e cahier : Cuivre et Mercure ; par MM. *Rousseau* et *Joannis*. In-8°, 316 p. avec fig. Paris, Ve Dunod. 15 fr. (4368)

FLOQUET (G.). — Sur le mouvement des membranes. In-8°, 7 p. Paris, Impr. nationale. (Extr. des *Comptes Rendus du Congrès des Sociétés savantes.*) (2192)

FRESENIUS (R.). — Traité d'analyse chimique qualitative (Des manipulations et opérations chimiques; Des réactifs et de leur action sur les corps les plus répandus ; Essais au chalumeau ; Analyse des eaux potables, des eaux minérales, des terres, des engrais, etc. ; Recherches chimico-légales ; Analyse spectrale ; Analyse micro-chimique). 10e édition française, rédigée d'après la 16e édition allemande, revue et mise au courant des travaux les plus récents par le docteur *L. Gautier*. Petit in-8°, VIII-743 p. avec 87 fig. dans le texte et un tableau colorié d'analyse spectrale. Paris, Masson et Cie. (3194)

GODFRIN (P.). — Les Chromates de bismuth ; Nouveau procédé de dosage volumétrique du bismuth ; Oxyiodures de bismuth; Présence du bismuth dans l'antimoine (thèse). In-8°, 51 p. Paris, Naud. (5446)

HEMSALECH (G.-A.). — La Constitution de l'étincelle électrique. In-8°, 15 p. avec fig. Tours, impr. Deslis frères. (Extr. du *Journal de physique.*) (3644)

JAVET (E.). — Chimie. A l'usage des chimistes, ingénieurs, industriels, professeurs, pharmaciens, directeurs et contremaîtres d'usines. 24e édition, complètement remaniée. Petit in-16, XIX-350-LXIV p. avec fig. Paris, Ve Dunod. 2f,50. (1922)

LAPRAS (J.). — Étude de quelques combinaisons moléculaires de la diphénylcarbazide (thèse). In-8°, 54 p. Lyon, Storck et Cie. (5825)

MARCUS DE VÈZE (J.). — La Transmutation des métaux (l'Or alchimique; l'Argentaurum). Divers procédés de fabrication, avec lettres et documents à l'appui. In-16, 52 p. Paris, Dorbon aîné. (1687)

MAURAIN (C.). — Sur une action magnétisante de contact et son rayon d'activité. In-8°, 16 p. Tours, impr. Deslis frères. (Extr. du *Journal de physique.*) (5860)

Digitized by Google

MOISSAN (H.). — Les Carbures métalliques, conférence faite le 21 juillet 1900, au Congrès international de chimie pure tenu à Paris du 17 au 22 juillet 1900. In-8°, 19 p. Paris, Impr. nationale. (Exposition universelle internationale de 1900. Ministère du Commerce.) (6165)

MOURGUES (A.). — Contribution à l'étude des persulfates alcalins. Leur dosage (thèse). In-8°, 52 p. Montpellier, impr. Delord-Boehm et Martial. (481)

NAUDET (G.). — Expériences d'électricité. I : Piles; Aimants; Machines électrostatiques, etc. In-18 jésus, 60 p. avec fig. Paris, Desforges. 1f,50. (308)

OSSEDAT (G.). — Sur deux ferrocyanures cuivreux et sur un cobaltocyanure cuivreux (thèse). In-8°, 44 p. Lyon, Storck et Cie. (1325)

PAILLOT (R.). — Recherches sur les forces électromotrices d'aimantation (thèse). In-8°, 91 p. avec fig. Lille, impr. Danel. (783)

SAINT-GERMAIN (A. de). — Contribution à la théorie du pendule sphérique. In-8°, 12 p. Caen, impr. Delesques. (Extr. des *Mémoires de l'Académie de Caen.*) (2573)

TÉTRY (L.). — Dérivés de l'acide O-benzoylbenzoïque. Nouvelles recherches sur l'essence de menthe Pouliot (thèse). In-8°, 77 p. Nancy, Impr. nancéienne. (1094)

3° *Minéralogie. — Géologie. — Paléontologie.*

ARCELIN (A.). — La Vallée inférieure de la Saône à l'époque quaternaire. In-8°, 40 p. avec fig. et planche. Chalon-sur-Saône, impr. Bertrand. (Extr. du *Bulletin des sciences nat. de Saône-et-Loire.*) (3292)

BRESSON (A.). — Étude des éléments tectoniques du massif ancien des Hautes-Corbières. Massif de Mouthoumet (Aude). In-8°, 16 p. Paris, Impr. nationale. (Extr. des *Comptes Rendus du Congrès des Sociétés savantes.*) (3156)

CAMUSAT (J.). — Géogénie des minerais de fer oolithiques de l'hettangien de la région de Mazenay (Saône-et-Loire). In-8°, 4 p. Paris, Impr. nationale. (Extr. du même recueil.) (2376)

CAPITAN (L.). — Passage du paléolithique au néolithique. Étude, à ce point de vue, des industries du Campigny, du camp de Catenoy, de l'Yonne et du Grand-Pressigny. In-8°, 11 p. avec fig. Angers, impr. Burdin et Cie. (613)

Digitized by Google

Carte géologique détaillée de l'Algérie à l'échelle de 1 50.000. Feuille n° 103 : Bosquet (département d'Oran). Paris, impr. Erhard frères. (230)

Carte géologique détaillée de la France à l'échelle de 1 80.000. Feuille 218 : Montauban. Prix : 6 fr. Paris, impr. Erhard frères. (209)

—— Feuille 225 : Nice. Prix : 6 fr. Paris, impr. et grav. Erhard frères. (210)

Carte géologique de Madagascar, à l'échelle de 1/2.500.000, par *E.-F. Gautier*. Dessinée et gravée par R. Hausermann. Paris, A. Challamel. (176)

Cossmann. — Essais de paléoconchologie comparée. 4e livraison. Grand in-8°, 299 p. avec fig. et 10 pl. Paris, l'auteur, 95, rue de Maubeuge ; Société d'éditions scientifiques. (638)

Dharvent (L.). — Premiers essais de sculpture de l'homme préhistorique. Notice et description d'une collection de silex à représentations anthropomorphes ou zoomorphes, à retouches intentionnelles, recueillie dans le diluvium inférieur du nord de la France. Grand in-8°, 38 p. et 9 planches. Rouen, impr. Lecerf. (4598)

Dumoutier (G.). — Notes de paléo-ethnologie, d'archéologie et de minéralogie archéolithique japonaises. In-8°, 8 p. Angers, imp. Burdin et Cie. (Extr. des *Comptes Rendus du Congrès internat. d'anthropol. et d'archéol. préhistoriques.*) (661)

Grossouvre (A. de). — Recherches sur la Craie supérieure. Première partie : Stratigraphie générale. Avec une monographie du genre *Micraster*, par *J. Lambert*. 2 fascicules in-4° avec cartes en noir et en couleurs. Fascicule 1er, p. 1 à 560 ; fascicule 2, p. 561 à 1013. Paris, Impr. nationale. (*Mémoires pour servir à l'explication de la Carte géologique détaillée de la France.*) (3222)

Hamy (E.-T.). — La Grotte du Kakimbon, à Rotoma, près Konakry (Guinée française). In-8°, 16 p. avec fig. Paris, Masson et Cie. (Extr. des *Comptes Rendus du Congrès internat. d'anthropol. et d'archéol. préhistoriques.* (962)

Héribaud (J.). — Les Diatomées fossiles d'Auvergne. Grand in-8°, 79 p. avec 2 planches dessinées par le commandant *M. Peragallo*. Clermont-Ferrand, pensionnat des Frères des Ecoles chrétiennes. Paris, Klincksieck. 5 fr. (3646)

Jérome. — L'Époque néolithique dans la vallée du Tonsus (Thrace). In-8°, 23 p. avec fig. Paris, Leroux. (Extr. de la *Revue archéologique.*) (1453)

Digitized by Google

KLOBB (T.). — De l'isomorphisme en cristallographie. Forme cristalline du sulfate et du séléniate lutéocobaltiques. In-8°, 6 p. Paris, Impr. nationale. (Extr. des *Comptes Rendus du Congrès des Sociétés savantes.*) (2469)

LACROIX (A.). — Sur l'application de la méthode expérimentale à l'étude des roches éruptives. In-8°, 8 p. Paris, Impr. nationale. (Extr. du même recueil.) (2473)

—— Minéralogie de la France et de ses colonies. (Description physique et chimique des minéraux ; Étude des conditions géologiques de leurs gisements.) T. III. 1er fascicule. In-8°, VI-400 p. avec fig. Paris, Béranger. 15 fr. (3387)

LASNE (H.). — L'Origine des phosphates de chaux de la Somme. Grand in-8°, 104 p. avec planches et photogravures hors texte. Paris, Bernard et Cie. (5054)

LAUNAY (L. de). — Études sur le plateau central. III : les Roches éruptives carbonifères de la Creuse (feuille d'Aubusson) (Microgranulites, Porphyres, Kersantites, Orthophyres et Porphyrites). In-8°, 120 p. avec 32 fig. et 2 planches. Paris, Béranger. (*Bull. des services de la Carte géologique de la France et des topographies souterraines.*) (5247)

LAURENT (L.). — Contribution à l'étude de la végétation du sud-est de la France. Flore de la basse vallée de l'Huveaune pendant le dépôt des argiles de Marseille. Petit in-4°, 59 p. avec fig. et planche. Marseille, imp. Barlatier. (Extr. des *Annales de la Faculté des sciences de Marseille.*) (4877)

LECLÈRE (A.). — Étude géologique et minière des provinces chinoises voisines du Tonkin. In-8°, 219 p. et pl. Paris, Ve Dunod. (Extr. des *Annales des Mines.*) (5832)

LEHMANN-NITSCHE (R.). — L'Homme fossile de la formation pampéenne (communication préliminaire). In-8°, 6 p. Paris, Masson et Cie. (Extr. des *Comptes Rendus du Congrès internat. d'anthropol. et d'archéol. préhistoriques.*) (724)

LEROY (G.). — Le Préhistorique au musée de Melun. In-18, 40 p. Melun, impr. Legrand. (2497)

LOË (A. de). — Découverte de palafittes en Belgique. In-8°, 11 p. Paris, Masson et Cie. (Extr. des *Comptes Rendus du Congrès internat. d'anthropol. et d'archéol. préhistoriques.*) (3690)

MÉCHIN (A.). — Contribution à l'étude des crustacés fossiles de Lorraine. II : Sur quelques formes nouvelles du genre *Eryma* (*Astacomorpha* fossiles) du jurassique de Lorraine. In-8°, 14 p. avec fig. et planche. Nancy, impr. Berger-Levrault et Cie. (1298)

Digitized by Google

MEUNIER (S.). — La Visite du congrès international de géologie au parc de l'École d'agriculture de Grignon. In-8°, 14 p. avec carte. Paris, les fils d'Émile Deyrolle. (Extr. du journal *le Naturaliste.*) (2261)

—— Sur les causes de la disparition des anciens glaciers des Vosges. In-8°, 11 p. Paris, Impr. nationale. (Extr. des *Comptes Rendus du Congrès des Sociétés savantes.*) (2262)

—— L'Activisme. In-8°, 12 p. Paris, les fils d'Émile Deyrolle. (Extr. du journal *le Naturaliste.*) (4465)

MOREL (G.). — Préhension des outils en pierre des époques préhistoriques. Période néolithique. 2 fascicules in-8°. 1er fascicule (Ciseaux), p. 1 à 56, avec 40 dessins et 4 planches photocollographiées ; 2e fascicule (Ciseaux; Gouges), p. 57 à 114, avec 37 dessins et 4 planches photocollographiées. Paris, Schleicher frères. (758)

POUTIATINE (P.). — Les Silex taillés et les premiers pas de la technique des retouches. In-8°, 3 p. Angers, impr. Burdin et Cie. (Extr. des *Comptes Rendus du Congrès internat. d'anthropol. et d'archéol. préhistoriques.*) (797)

RENAULT (B.). — Sur quelques cryptogames hétérosporées. In-8°, 16 p. avec fig. Autun, Dejussieu. (Extr. du *Bull. de la Soc. d'hist. nat. d'Autun.*) (3466)

RIGAUX (E.). — Note sur des sondages effectués à Boulogne-sur-Mer et aux environs. In-8°, 10 p. Boulogne-sur-Mer, impr. Hamain. (Extr. du *Bull. de la Soc. académique.*) (121)

RIVIÈRE (G.). — L'Age de la pierre. In-18 jésus, 184 p. avec 26 fig. dans le texte et 4 planches hors texte. Paris, Schleicher frères. 2 fr. (4044)

ROBIN (A.). — La Terre, ses aspects, sa structure, son évolution. Fascicule 1er. In-4° à 2 col., IV-10 p. avec grav. Paris, Larousse. (Le fascicule, 60 cent. L'ouvrage formera 26 fascicules.) (2017)

ROUSSEL (J.). — Sur l'émersion primitive des Pyrénées. In-8°, 4 p. Paris, Impr. nationale. (Extr. des *Comptes Rendus du Congrès des Sociétés savantes.*) (3255)

—— I, le Primaire de Betchat et de Cabanères ; la Granulite et l'Ophite de Betchat et de Salies-du-Salat ; II, le Pli du raz Mouchet; III, Transgressivité et Dénudation; les Klippes des Pyrénées; l'Age des couches à Caprines et à Orbitolines de la bande crétacée de Gabachou-Padern. In-8°, 47 p. avec 7 fig. dans le texte et 2 planches hors texte. Paris, Béranger. (*Bull. des services de la Carte géologique de la France et des topographies souterraines.*) (5290)

Digitized by Google

SAYN (G.). — Les Ammonites pyriteuses des marnes valangiennes du sud-est de la France. In-4°, 31 p. avec fig. Paris, Naud. [*Mém. de la Soc. géol. de France* (*Paléontologie*). Mém. n° 23.] (2773)

TARAMELLI (A.). — Quelques stations de l'âge de la pierre découvertes par l'ingénieur Piétro Gariazzo dans l'État indépendant du Congo. In-8°, 19 p. Paris, Masson et Cie. (Extr. des *C. R. du Congrès internat. d'anthropol. et d'archéol. préhistoriques.*) (1092)

THIEULLEN (A.). — Technologie néfaste. Industrie de la pierre taillée aux temps préhistoriques. Grand in-8°, 19 p. avec fig. Paris, impr. Larousse. (3804)

WALLERANT (F.). — Sur l'aimantation des corps cristallisés. In-8°, 23 p. avec fig. Tours, impr. Deslis frères. (Extr. du *Bull. de la Soc. française de minéralogie.*) (2601)

WILSON (T.). — La Haute Ancienneté de l'homme dans l'Amérique du Nord. In-8°, 43 p. avec fig. Paris, Masson et Cie. (Extr. des *Comptes Rendus du Congrès internat. d'anthropol. et d'archéol. préhistoriques.*) (841)

4° *Mécanique appliquée et Machines.*

AUTESSERRE (T.-L.). — Emploi des forces hydrauliques pour la navigation, l'industrie et l'agriculture par l'électricité. Rapport présenté à la chambre de commerce du Lot. Suivi de la copie d'un Rapport sur la navigation du Lot, dressé par M. l'ingénieur en chef de ce service. In-4°, 47 p. avec 1 carte et 3 planches en coul. Cahors, impr. Coueslant. (1146)

BACH (C.). — Éléments des machines (Leur calcul et leur construction; Élasticité et Résistance des matériaux; Procédés d'assemblage des organes des machines; Éléments de machines pour la transmission du mouvement de rotation d'un arbre à un autre, etc.). Traduit sur la 7e édition allemande par *L. Desmarest*, directeur des papeteries G. Maillet, à Thiers (Puy-de-Dôme). Grand in-8°, xv-713 p. avec 1 atlas de 54 planches et 580 fig. Paris, Béranger. (1568)

BARBET (E.). — Rapport sur le nouveau compteur à liquides de M. Louis Bedout. Petit in-8°, 4 p. Paris et Limoges, Charles Lavauzelle. (1149)

BERTIN (L.-E.). — Chaudières marines. Cours de machines à vapeur, professé à l'École d'application du génie maritime. 2e édition. Grand in-8°, 568 p. avec fig. Paris, Bernard et Cie. 25 fr. (4979)

Digitized by Google

Buchetti (J.). — Les Moteurs hydrauliques actuels. 2e édition. Deuxième partie : Construction. In-4°, II-91 p. av. 96 fig. Paris, l'auteur, 92, boulevard Saint-Germain. (2908)

Bulletin des accidents d'appareils à vapeur survenus pendant l'année 1900. (Résumé résultant de l'étude des dossiers administratifs.) In-8°, 16 p. et pl. Paris, Ve Dunod. (Extr. des *Annales des Mines.*) (5982)

Compte rendu des séances du vingt-cinquième congrès des ingénieurs en chef des associations de propriétaires d'appareils à vapeur, tenu à Paris en 1901. In-8°, 296 p. avec fig. dans le texte et 7 pl. hors texte. Paris, impr. Capiomont et Cie. (5171)

Concours général de moteurs et appareils utilisant l'alcool dénaturé, tenu à Paris du 16 au 24 novembre 1901. Rapports des jurys. In-8°, 92 p. avec fig. et carte. Paris, Impr. nationale. (Extr. des *Annales du Ministère de l'agriculture.*) (4152)

Crosnier. — Extrait du Rapport sur les générateurs et moteurs électriques à l'Exposition de 1900, de M. *Crosnier*, délégué du conseil municipal de Rouen. In-8°, 42 p. av. fig. Rouen, impr. Gy. (Extr. du *Bull. de la Soc. libre d'émulation du commerce et de l'industrie de la Seine-Inférieure.*) (4590)

Fontaine (L.). — L'Hydraulique agricole et les moteurs hydrauliques. In-8°, 145 p. avec 80 fig. Montpellier, Coulet et fils. Paris, Masson et Cie. 2f,50. (4847)

—— Les Machines à vapeur employées en agriculture. In-8°, 231 p. avec 195 fig. Montpellier, Coulet et fils. Paris, Masson et Cie. 3f,50. (4848)

—— Les Moteurs à gaz employés en agriculture. In-8°, 118 p. avec 73 fig. Montpellier, Coulet et fils. Paris, Masson et Cie. 2 fr. (4849)

—— Les Moteurs à vent employés en agriculture. In-8°, 72 p. avec 57 fig. Montpellier, Coulet et fils. Paris, Masson et Cie. 1f,25. (4850)

Moreau (G.). — Note sur le régime des moteurs à explosion (moteurs à quatre temps). In-8°, 71 p. avec fig. Paris, Ve Dunod. (Extr. des *Annales des mines.*) (3720)

Poignant (M.-P.). — Coefficient économique des machines à vapeur en raison de la détente au cylindre et de la formule $\frac{t - t_0}{t}$; Surchauffe de la vapeur. In-8°, 32 p. avec fig. Bordeaux, Feret et fils. Paris, Libraires associés, 13, rue de Buci. (4251)

Rateau (A.). — Recherches expérimentales sur l'écoulement de la vapeur d'eau par des tuyères et des orifices, suivies d'une

Digitized by Google

note sur l'écoulement de l'eau chaude. In-8°, 71 p. avec fig. Paris, V° Dunod. (Extr. des *Annales des mines.*) (5904)

RAZOUS (P.). — Les Scieries et les Machines à bois. In-8°, XXXI-445 p. avec fig. Paris, V° Dunod. 15 fr. (5906)

SCHMIDT. — Compte rendu du congrès international de surveillance et de sécurité en matière d'appareils à vapeur tenu à Paris en 1900, lecture faite à l'assemblée générale de la Société industrielle d'Amiens, le 30 janvier 1902. Grand in-8°, 32 p. Amiens, impr. Jeunet. (Extr. du *Bull. de la Soc. industrielle d'Amiens.*) (4938)

WITZ (A.). — Rendement comparé des machines à vapeur et des moteurs à gaz. In-4°, 27 p. Paris, Naud. (Extr. de *l'Éclairage électrique.*) (2857)

—— La Machine à vapeur. 2e édition, revue et augmentée. (Machines types Watt, Hornsby, Chaligny, Bonjour, Satre, etc.; Machines à grande vitesse; Machines demi-fixes; Machines locomobiles; Machines rotatives et Turbo-Moteurs.) In-18 jésus, VII-396 p. avec 117 fig. Paris, J.-B. Baillière et fils. (5641)

5° *Applications industrielles de la physique et de la chimie. — Métallurgie.*

Application des oscillographes à l'étude des alternateurs. In-4°, 11 p. avec fig. Paris, Naud. (Extr. de *l'Eclairage électrique.*) (2618)

ARCHAMBAULT DE VENÇAY. — Compte rendu du congrès international d'électricité tenu à Paris en 1900, lecture faite à l'assemblée générale de la Société industrielle d'Amiens, le 26 décembre 1901. In-8° oblong, 52 p. Amiens, impr. Jeunet. (Extr. du *Bull. de la Soc. industrielle d'Amiens.*) (3846)

ARTH (G.). — La Métallurgie du fer en Lorraine. In-8°, 8 p. Paris, Impr. nationale. (Extr. des *Comptes Rendus du Congrès des sociétés savantes.*) (3142)

BEUTON (E.). — Éclairage électrique et Transport d'énergie de la fabrique de cellulose et papier Feldmühle, à Cosel-Oderhafen. Petit in-4°, 11 p. avec fig. Paris, Naud. (Extr. de *l'Éclairage électrique.*) (5354)

CADIAT (E.) et L. DUBOST. — Traité pratique d'électricité industrielle. (Unités et Mesures ; Piles et Machines électriques; Éclairage électrique ; Transmission électrique de l'énergie ; Galvanoplastie et Électrométallurgie; Téléphonie.) 6e édition. Grand in-8°, II-737 p. avec 291 fig. Paris, Béranger. (5371)

Digitized by Google

Camichel (C.). — Le Laboratoire scientifique et l'Usine. In-8°, 16 p. Toulouse, Privat. (5985)

Claude (G.). — L'Électricité à la portée de tout le monde. (Courant continu; Courants variables; Courants alternatifs simples et polyphasés.) Grand in-8°, 360 p. avec fig. Paris, Ve Dunod. 6 fr. (2390)

Congrès international d'électricité (Paris, 18-25 août 1900). Rapports et Procès-verbaux, publiés par les soins de M. *E. Hospitalier*, rapporteur général. In-8°, 532 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars. 15 fr. (3583)

Daniel (J.). — Poudres et Explosifs. Dictionnaire des matières explosives. Préface de M. *Berthelot*, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, membre de l'Académie française. In-8°, x-819 p. avec fig. Paris, Ve Dunod. 30 fr. (3589)

Dehérain (P.-P.). — Traité de chimie agricole. (Développement des végétaux; Terre arable; Amendements et Engrais.) 2e édition, revue et augmentée. In-8°, xii-971 p. avec fig. Paris, Masson et Cie. (926)

Della Riccia (A.). — Sur l'action des courants d'échange entre alternateurs et parallèles. In-4°, 7 p. avec fig. Paris, Naud. (Extr. de *l'Éclairage électrique*.) (5406)

Dolezalek (F.). — La Théorie de l'accumulateur au plomb. Traduit de l'allemand par *Ch. Liagre*, directeur de l'usine de la Compagnie des accumulateurs Blot. In-8°, viii-179 p. avec fig. Paris, Béranger. (5745)

Dupont (J.). — L'Industrie des matières colorantes. Préface par *Ch. Lauth*, directeur de l'École de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris. In-18 jésus, xii-364 p. avec 31 fig. Paris, J.-B. Baillière et fils. (938)

Électricité (l') à l'Exposition de 1900, publiée avec le concours et sous la direction technique de MM. E. Hospitalier, rédacteur en chef de l'Industrie électrique, et J.-A. Montpellier, rédacteur en chef de l'Électricien, avec la collaboration d'ingénieurs et d'industriels électriciens. 4e fascicule : Transformation de l'énergie électrique (I. Transformateurs instantanés ou immédiats, par *E. Hospitalier;* II. Transformateurs différés ou Accumulateurs, par *A. Bainville*). Gr. in-8°, 93 p. avec fig. Paris, Ve Dunod. (941)

—— 14e fascicule : Compteurs électriques, par *J.-A. Montpellier* et *M. Aliamet*. Gr. in-8°, 60 p. avec fig. Paris, Ve Dunod. (3923)

—— 12e fascicule : Électrochimie et Électrométallurgie, par *A. Brochet*. Gr. in-8°, 139 p. avec fig. Paris, Ve Dunod. (5424)

Digitized by Google

FONTAINE (L.). — L'Électricité en agriculture (Machines dynamo-électriques; Dynamos à courants continus et alternatifs; Installations électriques; Applications à l'électricité). In-8°, 134 p. avec 127 fig. Montpellier, Coulet et fils. Paris, Masson et Cie. 2f,50. (4846)

GRUET (C.). — Manuel pratique d'électricité industrielle, à l'usage des contremaîtres, monteurs, ouvriers électriciens et mécaniciens s'occupant d'électricité. In-18 jésus, IV-399 p. avec 200 fig. dessinées par l'auteur. Paris, Béranger. (74)

GUILLET (L.). — Contribution à l'étude des alliages d'aluminium (thèse). In-4°, 53 p. et 6 planches. Paris, Renouard. (5039)

—— L'Industrie des acides minéraux. In-16, 184 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars ; Masson et Cie. (5225)

HOSPITALIER (E.). — Procès-verbaux sommaires du congrès international d'électricité tenu à Paris du 18 au 25 août 1900. In-8°, 63 p. Paris, Impr. nationale. (Exposition universelle internationale de 1900. Ministère du Commerce.) (1449)

—— Formulaire de l'électricien. (19e année, 1902.) In-16, VIII-460 p. avec fig. Paris, Masson et Cie. (3001)

JANNETTAZ (P.). — Les Convertisseurs pour cuivre. In-8°, 55 p. Paris, Baudry et Cie. (Extr. des *Mém. de la Soc. des Ingénieurs civils.*) (5807)

KANDO (von) et E. CSERHATI. — La Traction électrique par courants triphasés à haute tension sur lignes interurbaines; par *von Kando.* Comparaison entre la traction électrique et la traction à vapeur; par *Eugen Cserhati.* In-4°, 23 p. avec fig. Paris, Carré et Naud. (Extr. de *l'Éclairage électrique.*) (84)

LATOUR (M.). — Sur les propriétés des anneaux à collecteur. In-4°, 7 p. avec fig. Paris, Naud. (Extr. du même rec.) (2747)

—— Alternateurs à collecteur. In-4°, 11 p. avec fig. Paris, Naud. (Extr. du même recueil.) (5502)

LEBLANC (M.). — Sur la stabilité de la marche des commutatrices. In-4°, 11 p. avec fig. Paris, Naud. (Extr. du même recueil.) (2748)

LEBLOND (H.). — Complément du Cours d'électricité. In-8°, 191 p. avec fig. Paris, Impr. nationale. (Ministère de la marine.) (3213)

LEBOIS (M.-C.). — Cours élémentaire d'électricité industrielle. 1er fascicule. In-18 jésus, 108 p. avec fig. Paris, Delagrave. (270)

LE VERRIER (U.). — Métallurgie générale. Procédés de chauffage (Combustibles solides ; Description des combustibles; Combustibles artificiels; Emploi des combustibles; Chauffage par l'électricité ; Matériaux réfractaires; Organisation d'une usine

Digitized by Google

métallurgique ; Données numériques.) In-8°, 371 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars. (5844)

Loëber (F.-M.). — Traité pratique d'électricité appliquée à l'industrie (Principes ; Construction ; Emploi des machines dynamo et accumulateurs). Petit in-8°, 152 p. avec fig. Lyon, Rey et Cie. (1281)

Montpellier (J.-A.). — Électricité. A l'usage des électriciens, ingénieurs, industriels, chefs d'ateliers, mécaniciens et contremaîtres. 24e édition, complètement remaniée. Petit in-16, XII-228-LXIV p. avec fig. Paris, Ve Dunod. 2f,50. (1966)

Petitgout (E.). — Fabrication de l'acide sulfurique. Procédés de contact. In-16, 32 p. avec 10 fig. Paris, Tignol. (1720)

Perret (A.). — Les Explosifs. In-16°, 160 p. avec fig. Paris, Bernard et Cie. 1f,50. (5081)

Reyval (J.). — Accumulateurs « Peigne » de la Société électrique du Nord. In-4°, 3 p. avec fig. Paris, Naud. (Extr. de *l'Éclairage électrique*.) (2826)

Roessler (G.). — Électromoteurs (I : Courant continu). Traduit de l'allemand par *E. Samitca*, ingénieur des arts et manufactures. In-8°, VI-154 p. avec fig. Paris, Ve Dunod. 6f,50. (3768)

Rothert (A.). — Grands alternateurs. In-4°, 36 p. avec fig. Paris, Naud. (Extr. de *l'Éclairage électrique*.) (2830)

Solanet (A.). — Cours complet de chimie agricole. In-16, 588-IV p. Mende, impr. Pauc. (3482)

Sorel (E.). — La Grande Industrie chimique minérale. In-8°, 813 p. avec fig. Paris, Naud. (5920)

Vigneron (E.). — Mesures électriques. Essais industriels. In-16, 172 p. avec fig. Paris, Gauthier-Villars ; Masson et Cie. 2f,50. (839)

Villon (A.-M.) et P. Guichard. — Dictionnaire de chimie industrielle, contenant les applications de la chimie à l'industrie, à la métallurgie, à l'agriculture, à la pharmacie, à la pyrotechnie et aux arts et métiers. 2 fascicules in-4° à 2 col. de 40 p. chacun, avec fig. T. II, fascicule 20 ; t. III, fascicule 32. Paris, Tignol. 2 fr. le fascicule. (1769)

Vincent (A.). — Nouveau convertisseur universel de M. Maurice Leblanc. In-4°, 19 p. avec fig. Paris, Naud. (Extr. de *l'Éclairage électrique*.) (2853)

Wencélius (A.). — Méthodes d'analyse des laboratoires d'aciéries Thomas, à l'usage du personnel des chimistes et des manipulateurs. In-16, VIII-119 p. avec fig. Paris, Béranger. (5310)

Digitized by Google

6° *Exploitation des mines. — Gîtes minéraux.*

BEUTOM (E.). — Installations électriques dans les mines de la Société minière de Riebeck, près de Halle. Petit in-4°, 8 p. avec fig. Paris, Naud. (Extr. de *l'Éclairage électrique.*) (5355)

Carte minière de la Côte d'Ivoire, à l'échelle de 1/250.000, dressée par *L. Delvaux*, ingénieur, et *L. Pautrat*, explorateur, d'après les cartes des explorateurs Binger, Marchand, Pobéguin, Spicq, Boudaille, Blondiaux, Wœlffel, Thomann, Hostains, d'Olonne, etc., et mise à jour d'après les relevés les plus récents de L. Delvaux et L. Pautrat. Paris, Pradel. (391)

CHALON (P.-F.). — Aide-mémoire du mineur et du prospecteur. Nouvelle édition, entièrement refondue. In-16, XII-112 p. Paris, Béranger. (5164)

CHESNEAU (G.). — Sur une nouvelle lampe de sûreté à essence, système Wolff, à introduction d'air par le bas, rallumeur à friction et fermeture magnétique. In-8°, 16 p. avec fig. Paris, V° Dunod. (Extr. des *Annales des mines.*) (5709)

GLASSER (E.). — Note sur certaines causes spéciales de fatigue des câbles d'extraction. In-8°, 60 p. Paris, V° Dunod. (Extr. du même recueil.) (2444)

JACQUES (C.). — Étude des gisements carbonifères néo-calédoniens. In-4°, 43 p. avec carte et plans. Melun, impr. Legrand. (1256)

LACROIX (A.). — Sur les gisements stannifères de Hin-Boun (Laos). Petit in-8°, 23 p. Tours, impr. Deslis frères. (Extr. du *Bull. de la Soc. française de minéralogie.*) (5050)

NEUBURGER (H.). — Les Gisements pétrolifères du département d'Oran. Rapport adressé au gouverneur général. In-8°, 103 p. Mustapha, Impr. algérienne. (104)

Note sur l'explosion d'un dépôt souterrain de dynamite à la fosse Fénelon de la Compagnie des mines d'Aniche (Nord). In-8°, 31 p. et pl. Paris, V° Dunod. (Extr. des *Annales des mines.*) (5879)

TROTTIER (R.). — Rapport relatif aux gîtes métallifères d'Elæncer et d'El Madden, près le Fondouck (Algérie). In-8°, 24 p. Alger, impr. Fontana et Cie. (139)

VILLAIN. — Les Minerais de fer du département de Meurthe-et-Moselle. In-8°, 16 p. Paris, Impr. nationale. (Extr. des *Comptes Rendus du Congrès des Sociétés savantes.*) (2312)

Digitized by Google

7° *Construction. — Chemins de fer.*

Berger (C.) et V. Guillerme. — La Construction en ciment armé (Applications générales; Théories et Systèmes divers). Préface d'*E. Candlot*. In-8°, VIII-886 p. avec fig. Paris, Ve Dunod. 40 fr. avec atlas. (5666)

Blanc (P.). — Chemins de fer; à l'usage des agents de la construction, de la voie, du matériel, de la traction, de l'exploitation et de toutes les personnes qui s'intéressent aux chemins de fer. 24e édition, complètement remaniée. Petit in-16, XX-309-LXIV p. avec fig. Paris, Ve Dunod. 2f,50. (1826)

Bonneau (H.) et E. Desroziers. — Étude sur la traction électrique des trains de chemin de fer. In-8°, 20 p. avec fig. Paris, Baudry et Cie. (5360)

Christophe (P.). — Le Béton armé et ses applications. 2e édition, refondue et augmentée. In-8°, XIX-760 p. avec fig. Paris, Béranger. (2651)

Cosyn (L.). — Étude théorique sur la résistance des voûtes. In-8°, 84 p. avec graphiques et fig. Paris, Béranger. (Extr. des *Nouvelles Annales de la construction.*) (5397)

Maréchal (H.). — Les Tramways électriques (Dispositions générales ; Voie ; Tramways à conducteurs aériens, souterrains, à contacts superficiels ; Tramways à accumulateurs; Matériel roulant, Dépôts, Ateliers ; Production et Transformation de l'électricité; Exploitation; Dépenses ; Concessions; Réglementation). 2e édition, entièrement refondue. In-8°, VI-328 p. avec fig. Paris, Béranger. (2765)

Péducasse (B.). — Les Appareils de sécurité pour tramways et voitures à traction mécanique. Compte rendu des expériences faites au palais du Commerce, à Lyon, le 8 novembre 1900. Exposé et Conclusions de l'inventeur. Petit in-8°, 12 p. Lyon, impr. Rey et Cie. (1039)

Pons (A.). — Etude d'une travée métallique biaise, suivie de quelques remarques sur les calculs des entretoises. In-8°, 32 p. avec fig. et 2 pl. Pontivy, impr. Anger. (496)

—— Ponts-routes à travées métalliques. Calcul des pièces de pont. Tables et Formules donnant directement: 1° la position des véhicules pour laquelle le moment fléchissant est maximum; 2° la position de la section de la pièce où se développe ce moment; 3° la valeur de ce dernier. In-4°, 259 p. avec fig. Paris, Bernard et Cie. (497)

Digitized by Google

Rapports du jury international de l'Exposition universelle internationale de 1900, à Paris. Classe 28 (Matériaux, Matériel et Procédés du génie civil). Rapport de M. *Paul Debray*, ingénieur en chef des ponts et chaussées. Grand in-8°, 94 p. Paris, Impr. nationale. (Exposition universelle internationale de 1900. Ministère du Commerce.) (1505)

Statistique des chemins de fer français au 31 décembre 1900. Documents principaux. In-4°, VI-537 p. et cartes. Paris, Impr. nationale. 5 fr. (Ministère des travaux publics.) (4943)

—— Documents divers. Deuxième partie: Intérêt local et Tramways (France et Algérie). In-4°, 401 p. Paris, Impr. nationale. 5 fr. (Ministère des travaux publics.) (516)

8° *Législation. — Économie politique et sociale.*

Berthiot (A.). — Loi du 9 avril 1898 concernant les responsabilités des accidents dont les ouvriers sont victimes dans leur travail. Commentaire pratique, spécialement à l'usage des industriels, ouvriers et employés. 4e édition, revue et mise au courant de la jurisprudence et des modifications apportées par la loi du 22 mars 1902. In-8°, 60 p. Chalon-sur-Saône, impr. Bertrand. 0f,40. (4558)

Colson (C.). — Cours d'économie politique professé à l'École nationale des ponts et chaussées. (Trois volumes.) Tome Ier. Exposé général des phénomènes économiques. Le travail et les questions ouvrières. In-8°, 600 p. Paris, Gauthier-Villars. 10 fr.

Courcelle (L.). — Traité de législation ouvrière [Contrats de travail; Bureaux de placement; Contestations et Conflits entre patrons et ouvriers (coalitions, grèves, conciliation et arbitrage); Travail dans l'industrie; Accidents du travail. Conseils des prud'hommes et du travail; Associations ouvrières, professionnelles, coopératives; Sociétés de secours mutuels; Récompenses et Retraites ouvrières, etc.]. Avec une préface de M. *Paul Beauregard*, député de Paris, professeur d'économie politique à la Faculté de droit de Paris. In-8°, III-588 p. Paris, Giard et Brière. 10 fr. (3172)

Cuvillier (T.). — Législation minière et Contrôle des mines. In-16, XII-788 p. Paris, Ve Dunod. (1203)

Delcourt-Haillot. — Le Programme des mineurs jaunes. In-16, 32 p. avec portraits. Paris, 54, rue de Seine. (Extr. de *la Réforme sociale.*) (4162)

Digitized by Google

HUTTEN (G.-C.). — Mineur du bassin houiller du couchant de Mons (Borinage, Belgique), ouvrier tâcheron dans le système des engagements momentanés, d'après les renseignements recueillis sur les lieux en août 1900. In-8°, 75 p. Paris, secrétariat de la Société d'économie sociale, 54, rue de Seine. (Extr. des *Ouvriers des Deux Mondes.*) (447)

LEFRANC (M.). — Les Syndicats indépendants du Creusot et de Montceau. Avec des lettres-préfaces de MM. *Mangematin* et *Burtin*, présidents des syndicats indépendants du Creusot et de Montceau. Petit in-16, 32 p. Paris, 54, rue de Seine. 0f,05. (5056)

Question (la) du rachat des chemins de fer. In-8°, 54 p. Paris, Chaix. (2821)

Rapports du jury international de l'Exposition universelle internationale de 1900, à Paris. Classe 105 (Sécurité des ateliers; Réglementation du travail). Rapport de M. *André Sabatier*, membre et rapporteur du jury des récompenses. Grand in-8°, 92 p. Paris, Impr. nationale. (Exposition universelle internationale de 1900. Ministère du commerce.) (1507)

Recueil de documents sur les accidents du travail réunis par le Ministère du commerce. N° 2 : Loi du 9 avril 1898, modifiée par la loi du 22 mars 1902, et Règlements d'administration publique du 28 février 1899. Petit in-8°, 25 p. Paris et Nancy, Berger-Levrault et Cie. (5285)

ROGER (J.). — Du transport des personnes par chemins de fer (thèse). In-8°, 195 p. Montpellier, impr. Delord-Boehm et Martial. (4726)

VIEL (M.). — Des délais et des retards en matière de transports par chemins de fer (thèse). In-8°, 274 p. Caen, impr. Valin. (5128)

9° *Objets divers.*

BERNARD (A.). — Le Calcaire. Sa détermination et son rôle dans les terres arables. 2e édition, revue et augmentée, d'après les notes de l'auteur, par *L. Mathieu*, directeur de la station œnologique de Bourgogne, à Beaune. In-16, VI-328 p. avec fig. et portrait. Chaumont (Haute-Marne), Mme Adrien Bernard ; les principaux libr. 3f,50. (4314)

DEFAYS (J.) et H. PITTET. — Étude pratique sur les différents systèmes d'éclairage (gaz, acétylène, pétrole, alcool, électricité). In-16, 171 p. Paris, Gauthier-Villars; Masson et Cie. (5178)

FAVRE (L.). — Contribution à l'étude de la méthode dans les

Digitized by Google

sciences expérimentales. In-16, XXV-470 p. Paris, Schleicher frères. (945)

JANSSEN. — Conférence sur la constitution du Soleil et l'observatoire du mont Blanc. In-4°, 13 p. Rouen, impr. Gy. (Extr. du *Bull. de la Soc. normande de géographie.*) (3380)

LEVAT (D.). — Mines et Métallurgie. A l'usage des ingénieurs, contrôleurs des mines, maîtres mineurs, maîtres de forges, directeurs, contremaîtres d'usines métallurgiques, etc. 24e édition, complètement remaniée. Petit in-16, X-276-LXIV p. avec fig. Paris, Ve Dunod. 2f,50. (1946)

MACÉ DE LÉPINAY (J.). — Franges d'interférence et leurs applications météorologiques. Petit in-8°, 101 p. avec fig. Chartres, impr. Durand. (*Scientia.* Physique mathématique.) (2759)

OCAGNE (d') et E. SAUVAGE. — Notice sur Eugène Vicaire, inspecteur général des mines ; par M. *d'Ocagne*, ingénieur des ponts et chaussées. Suivie d'une note additionnelle par M. *Ed. Sauvage*, ingénieur en chef des mines, professeur à l'École nationale supérieure des mines. In-8°, 16 p. Paris, Ve Dunod. (Extr. des *Annales des mines.*) (3727)

PERRIET (E. et R.), P. POIRÉ et A. JOANNIS. — Nouveau Dictionnaire des sciences et de leurs applications. Avec la collaboration d'une réunion de savants, de professeurs et d'ingénieurs. Fascicules 34 à 43. In-8° à 2 col., p. 2097 à 2720, avec fig. Paris, Delagrave. Publié en 48 fascicules de 64 p., du prix de 1 fr. chacun. (314-4898)

Rapports du jury international de l'Exposition universelle internationale de 1900, à Paris. Classe 37 (Matériel et Procédés des industries agricoles). Rapport de M. *L. Lindet*, docteur ès sciences, professeur de technologie agricole à l'Institut national agronomique. Grand in-8°, 62 p. Paris, Impr. nationale. (Ministère du Commerce.) (5582)

RAZOUS (P.). — Usines et Manufactures. A l'usage des constructeurs d'usines et de bâtiments industriels, des ingénieurs et des directeurs d'usines et de manufactures, des contremaîtres et des chefs d'ateliers. Petit in-16, VI-300-LXIV p. avec fig. Paris, Ve Dunod. 2f,50. (2007)

Statistique de l'industrie minérale et des appareils à vapeur en France et en Algérie pour l'année 1900. In-4°, XXVIII-226 p. et 22 planches. Paris, Ve Dunod ; Béranger. 10 fr. (Ministère des travaux publics.) (3265)

Digitized by Google

OUVRAGES ANGLAIS.

1° *Mathématiques et Mécanique pures.*

British Association Meeting at Glasgow, 1901. Discussion on the Teaching of Mathematics. Edit. by *John Perry*. In-8°. Macmillan. 2f,50.

Darwin (G.-H.). — On the Pear-Shaped Figure of Equilibrium of a Rotating Mass of Liquid. In-4°. Dulau. 1f,90.

Filon (L.-N.-G.). — On the Elastic Equilibrium of Circular Cylinders under certain Practical Systems of Load. In-4°. Dulau. 6f,90.

Forsyth (A.-R.). — Theory of Differential Equations. Part. 3. (Vol. 4.) Ordinary Linear Equations. In-8°. Cambridge University Press. 15f,65.

Pearson (K.). — On the Mathematical Theory of Errors of Judgment, with Special Reference to Personal Equation. In-4°. Dulau. 5 fr.

2° *Physique et Chimie.*

Ayrton (H.). — The Electric Arc. In-8°, 506 p. Electrician. 15f,65.

Bonney (G.-E.). — Induction Coils. A Practical Manual for Amateur Coil Makers. 2nd ed. Revised and Enlarged by an extra Chapter on Coils, specially constructed for Radiography. With 135 Illusts. In-8°, 248 p. Whittaker. 3f,75.

Cooper (W.-R.). — Primary Batteries : Their Theory, Construction and Use. In-8°, 330 p. Electrician. 13f,15.

Crew (H.) and Tatnall (R.-R.). — A Laboratory Manual of Physics. In-8°, 248 p. Macmillan. 6f,25.

Jones (H.-C.). — Elements of Physical Chemistry. In-8°. Macmillan. 21f,25.

Lehfeldt (R.-A.). — A Text-Book of Physics. With Sections on the Application of Physics to Physiology and Medicine. In-8°, 312 p. E. Arnold. 7f,50.

Perkin (W.-H.) and Lean (B.). — An Introduction to Chemistry and Physics. 2 Vols. New ed. In-8°, 222-228 p. Macmillan. Chaque vol. 2f,50.

Digitized by Google

RAYLEIGH (Lord). — On the Law of the Pressure of Gases between 75 and 150 millimetres of Mercury. In-4°. Dulau. 1f,25.

ROUTH (E.-J.). — A Treatise on Analytical Statics. With Illusts. taken from the Theories of Electricity and Magnetism. Vol. 2. 2nd ed. Revised and Enlarged. In-8°, 390 p. Cambridge University Press. 17f,50.

SEARLE (G.-F.-C.) and BEDFORD (T.-G.). — The Measurement of Magnetic Hysteresis. In-4°. Dulau. 4f,40.

STEELE (B.-D.). — The Measurement of Ionic Velocities in Aqueous Solution, and the Existence of Complex Ions. In-4°. Dulau. 2f,50.

THORPE (T.-E.). — Essays in Historical Chemistry. In-8°, 594 p. Macmillan. 15 fr.

WATSON (W.). — A Determination of the Value of the Earth's Magnetic Field in International Units, and a Comparison of the Results with the Values given by the Kew Observatory Standard Instruments. In-4°. Dulau. 1f,25.

3° *Minéralogie. — Géologie. — Paléontologie.*

BROWNE (A.-J. JUKES). — The Student's Handbook of Stratigraphical Geology. In-8°. Stanford. 15 fr.

BRIGHAM (A.-P.). — A Text-Book of Geology. In-8°. Hirschfeld. 7f,50.

GEIKIE (Sir A.). — Class Book of Geology. 4th ed. Illust., with Woodcuts. In-8°, 476 p. Macmillan. 6f,25.

GEIKIE (J.). — Earth Sculpture; or, the Origin of Land Forms. New ed. In-8°, 336 p. J. Murray. 7f,50.

SCOTT (D.-H.). — On the Structure and Affinities of Fossil Plants from the Palæozoic Rocks. 4. The Seed-like Fructification of Lepidocarpon, a Genus of Lycopodiaceous Cones from the Carboniferous Formation. In-4°. Dulau. 5 fr.

THORODDSEN (T.). — Geological map of Iceland, surveyed in the years 1881-1898. Ed. by the Carlsberg Fund. 1 : 600.000. 2 feuilles. Copenhague. 15 fr.

4° *Mécanique appliquée et Machines.*

BEAUMONT (W.-W.). — Motor Vehicles and Motors : Their Design, Construction, and Working by Steam, Oil, and Electricity. 2nd ed., revised. In-8°, 652 p. Constable. 52f,50.

Digitized by Google

BJORLING (P.-R.). — Pumps : their Construction and Management. With 91 Illusts. In-8°, 78 p. Spon. 4f,40.

BODMER (G.-R.). — Hydraulic Motors and Turbines. For the use of Engineers, Manufacturers, and Students. 3rd ed. Revised and Enlarged. With 194 Illusts. In-8°, 582 p. Whittaker. 18f,75.

DUNLOP (H.-C.) and JACKSON (C.-S.). — Slide Rule Notes. In-4°, 68 p. Simpkin. 3f,75.

HARMSWORTH (A.-C.) and others. — Motors and Motor Driving. With Illusts. by *H. M. Brock*, *H. Tringham*, and from Photographs. In-8°, 476 p. Longmans. 11f,25.

INNES (C.-H.). — The Centrifugal Pump, Turbines, and Water Motors, including the Theory and Practice of Hydraulics. In-8°, 234 p. Technical Pub. Co. 5f,65.

NORRIS (W.) and MORGAN (B.-H.). — High-Speed Steam Engines. With 156 Illusts. 2nd ed. In-8°, 220 p. S. King. 13f,15.

PORTER (C.-T.). — A Treatise on the Richards Steam Engine. Indication and the Development and Application of Force in the Steam Engine. 6th ed. In-8°, 286 p. Spon. 11f,25.

THOMPSON (Sir H.). — The Motor-car. An Elementary Handbook on its Nature, Use and Management. With Illusts. In-8°, 108 p. Warne. 3f,15.

5° *Applications industrielles de la physique et de la chimie. — Métallurgie.*

BELL (L.). — Electric Power Transmission. With 31 Plates, 282 Illustrations. 3rd ed. Revised and Enlarged. In-8°, XII-632 p. Whittaker. 18f,75.

BOTTONE (S.-R.). — Wireless Telegraphy and Hertzian Waves. With 37 Illusts. 2nd ed., revised. In-8°, 136 p. Whittaker. 3f,75.

EISSLER (M.). — The Hydro-Metallurgy of Copper. Being an Account of Processes adopted in the Hydro-Metallurgical Treatment of Cupriferous Ores, Including the Manufacture of Copper Vitriol. With Chapters on the Sources of the Supply of Copper and the Roasting of Copper Ores. In-8°, 240 p. Crosby Lockwood and Son. 15f,65.

FOSTER (H.). — Electrical Engineer's Pocket Book. In-12. Spon. 26f,25.

GOWER (A.-R.). — Practical Metallurgy. An Elementary Text-Book. New ed. In-8°, 128 p. Chapman and Hall. 1f,25.

Digitized by Google

HISCOX (G.-D.). — Compressed Air; its Production, Uses, and Applications. Comprising the Physical Properties of Air from a Vacuum to its Liquid State, its Thermodynamics, Compression, Transmission, and uses as a Motive Power. In-8°, 822 p. Low. 31f,25.

JAMES (A.). — Cyanide Practice. In-4°, 186 p. Spon. 18f,75.

Manual of Electrical Undertakings and Directory of Officials, 1901-1902. In-8°. Office. 15f,65.

MUIR (J.). — On the Tempering of Iron Hardened by Overstrain. In-4°. Dulau. 2f,50.

PHILLIPS (H.). — Engineering Chemistry. A Practical Treatise for the use of Analytical Chemists, Engineers, Ironmasters, Ironfounders, Students, and Others. 3rd ed. Revised and Enlarged. In-8°, 422 p. Crosby Lockwood and Son. 13f,15.

POWELL (F.-E.). — Small Dynamos and Motors, How to Make and Use Them. In-8°. Dawbarn and W. 0f,65.

RHEAD (E.-L.) and SEXTON (A.-H.). — Assaying and Metallurgical Analysis for the Use of Students, Chemists, and Assayers. In-8°, 442 p. Longmans. 13f,15.

RHODES (W.-G.). — An Elementary Treatise on Alternating Currents. In-8°, 224 p. Longmans. 9f,40.

ROSE (T.-K.). — The Metallurgy of Gold. Edit. by Sir *W. C. Roberts-Austen*. With numerous Illusts. 4th ed. In-8°, 570 p. C. Griffin. 26f,25.

SALAMONS (Sir D.). — Electric Light Installations. Vol. 2. Apparatus. 8th ed. Revised and Enlarged. In-8°, 344 p. Whittaker. 9f,40.

SLOANE (T. O'CONOR). — The Standard Electrical Dictionary. A Popular Encyclopædia of Words and Terms used in the Practice of Electrical Engineering. 3rd ed. With Appendix. In-8°, 682 p. Crosby Lockwood and Son. 9f,40.

THWAITE (B.-H.). — The Generation of Transmission of Electric Energy at and from Coal Pit Centres. In-8°. Spon. 3f,15.

WARREN (J.). — Guide to the Practical Elements of Electrical Testing. In-8°, 192 p. S. Rentell. 4f,40.

WIENER (A.-E.). — Practical Calculations of Dynamo Electric Machines. 2nd ed. Revised and Enlarged. In-8°, XXXVI-728 p. Whittaker. 18f,75.

WINKLER (C.). — Handbook of Technical Gas Analysis. 2nd ed. Edit. by *C. Lunge*. In-8°. Gurney and J. 13f,15.

Digitized by Google

6° *Exploitation des mines. — Gîtes minéraux.*

BROUGH (B.-H.). — A Treatise on Mine Surveying. 9th ed., revised, with numerous Diagrams. In-8°, 384 p. Griffin. 9f,40.

DENNY (G.-A.). — The Deep Level Mines of the Rand and their Future Development Considered from the Commercial Point of View. With Illusts. In-4°, 182 p. Crosby Lockwood and Son. 31f,25.

ISLER (C.). — Well Boring for Water, Brine, and Oil. A Manual of Current Practice. In-8°, 208 p. Spon. 12f,50.

KASSNER (T.). — Gold-Seeking in South Africa. A Handbook for intending Explorers, Prospectors, and Settlers. With a Chapter on the Agricultural Prospects of South Africa. With Maps and Illusts. In-8°, 144 p. Griffin. 5f,65.

LUPTON (A.). — A Practical Treatise on Mine Surveying. With Illusts. In-8°, 422 p. Longmans. 15 fr.

Parliamentary. — Mines. Talk-of-the-Hill Colliery Explosion, Staffordshire, May 27, 1901. Report on Photographs and Plans. 2 fr.

—— Mines and Quarries. General Report and Statistics for 1900. Part 4. Colonial and Foreign Statistics. 1f,90.

SKINNER (W.-R.). — The Mining Manual for 1902. In-8°. Office. 26f,25.

7° *Construction. — Chemins de fer.*

BODMER (G.-R.). — The Inspection of Railway Materials. With 3 Plates and 19 Diagrams. In-8°, 164 p. Whittaker. 6f,25.

COOKE (C.-J.-B.). — Some Recent Developments in Locomotive Practice. An Adaptation of Two Lectures delivered at the Royal Engineer's Institute, Chatham. In-8°, 84 p. Whittaker. 3f,15.

KEMPE (H.-R.). — The Engineer's Year Book of Engineering Formulæ, Rules, Tables, Data and Memoranda, 1902. In-8°, Crosby Lockwood and Son. 10 fr.

International Engineering Congress, Glasgow, 1901. Proceeding of section I. Railways. In-8°, 90 p. et pl. Clowes and Sons.

Parliamentary. — Railway Accidents. Returns and Inspector's Reports, January to September, 1901. 1f,35.

Digitized by Google

8° *Objets divers.*

Box (T.). — Practical Hydraulics. A Series of Rules and Tables for the use of Engineers. 13th ed. In-8°, 88 p. Spon. 6f,25.

Darwin (G.-H.). — Ellipsoidal Harmonic Analysis. In-4°. Dulau. 5f,65.

Fidler (T.-C.). — Calculations in Hydraulic Engineering. A Practical Text-Book for the use of Students, Draughtsmen, and Engineers. In-8°. Longmans. 9f,40.

Hutton (W.-T.). — The Practical Engineer's Handbook. 6th ed., with upwards of 420 illusts., carefully revised and enlarged. In-8°, 558 p. Crosby Lockwood and Son. 22f,50.

North Polar-Expedition, the Norwegian, 1893-1896. Scientific results, ed. by *F. Nansen*. Vol. III. Published by the Fridtjof Nansen fund for the advancement of science. v-xi-427 et 88 p. av. 33 pl. et cartes. Gr. in-4°. Christiania. 40 fr.

OUVRAGES AMÉRICAINS.

Michelson (A.-A.). — The Velocity of Light. (Extr. des *Decennial Publications of the University of Chicago.*) In-4°, 12 p. Chicago, University Chicago Press. 1f,25.

Smith (A.). — Laboratory Outline of General Chemistry. In-12, 90 p. Chicago, Univ. of Chicago Press. 3f,15.

Smith (J.-P.) and Weller (S.). — Prodromites. A new Ammonite Genus from the Lower Carboniferous. (Extr. des *Contributions from Walker Museum.*) In-8°, 9 p. avec planches. Chicago, Univ. of Chicago Press. 1f,90.

United States Geological Survey. 21th Annual Report to the Secretary of the Interior, 1899-1900. — Part. 2. General Geology, Economic Geology, Alaska. — Part. 3. General Geology, Ore and Phosphaté Deposits, Philippines. Illust. In-4°. Washington, Government Printing Office.

Digitized by Google

OUVRAGES ALLEMANDS.

1° *Mathématiques et Mécanique pures.*

ADLER (A.). — Zum Normalenproblem der Flächen zweiten Grades. (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 9 p. av. 1 pl. Vienne, C. Gerold's Sohn. 0f,50.

ALBRICH jun. (C.). — Die Lehre von der Bewegung fester Körper. Ein Unterrichtsgang auf historischer Grundlage. In-8°, 69 p. av. fig. Hermannstadt, W. Kraft. 0f,55.

BRUNN (H.). — Neue Mittelwerthsätze über bestimmte Integrale. (Extr. des *Sitzungsber. d. bayer. Akad. d. Wiss.*) In-8°, p. 91-112 av. fig. Munich, G. Franz. 0f,50.

DAUBLEBSKY V. STERNECK (R.). — Empirische Untersuchung über den Verlauf der zahlentheoretischen Function $\sigma(n) - \sum_{x=1}^{x=n} \mu(x)$ im Intervalle von 150.000 bis 500.000. (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 50 p. av. 1 pl. Vienne, C. Gerold's Sohn. 15 fr.

Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen. II. Bd. Analysis. 2. Tl. Red. v. *H. Burkhardt*. 1. Hft. In-8°, 175 p. Leipzig, B. G. Teubner. 6f,50.

ESCHERICH (G. v.). — Die 2. Variation der einfachen Integrale. (V. Mittheilg.) (Extr. des *Sitzungber. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 67 p. Vienne, C. Gerold's Sohn. 1f,50.

FISCHER (K.-T.). — Neuere Versuche zur Mechanik der festen u. flüssigen Körper. Mit einem Anhang über das absolute Maasssystem. Ein Beitrag zur Methodik des physikal. Unterrichts. In-8°, v-68 p. av. 55 fig. Leipzig, B. G. Teubner. 2f,50.

FÖPPL (A.). — Die Mechanik im 19. Jahrh. Ein akadem. Festvortrag. In-8°, 25 p. Münich, E. Reinhardt. 1 fr.

FROBENIUS (G.). — Über auflösbare Gruppen. IV. V. (Extr. des *Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 21 p. Berlin, G. Reimer. 1f,25.

—— Über Gruppen des Grades p od. $p + 1$. — Über primitive Gruppen des Grades n u. der Classe $n - 1$. (Extr. du même recueil.) In-8°, 24 p. Berlin, G. Reimer, 1f,25.

FUCHS (L.). — Über Grenzen, innerhalb deren gewisse bestimmte

Digitized by Google

Integrale vorgeschriebene Vorzeichen behalten. (Extr. du même recueil.) In-8°, 7 p. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

FURTWÄNGLER (P.). — Über die Schwingungen zweier Pendel m. annähernd gleicher Schwingungsdauer auf gemeinsamer Unterlage. (Extr. du même recueil.) In-8°, 9 p. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

GAUSS (F.-G.). — Fünfstellige vollständige trigonometrische u. polygonometrische Tafeln f. Maschinenrechnen. Teilung des Quadranten in 90 Grade zu 60 Minuten. In-8°, 100-XVIII p. Halle, E. Strien. 8f,75.

GLASER (S.). — Untersuchung der Flächen 3. Grades, welche bei der Abbildung nach dem Prinzip der reziproken Radienvektoren wieder in sich selbst zurückkehren. 1. Tl. In-4°, 29 p. Berlin, R. Gaertner. 1f,25.

GRONAU (K.-T.-E.). — Das Parallelenproblem oder der Beweis des elften euklidischen Axioms als Lehrsatzes. In-8°, VII-33 p. av. fig. Hagen i. W. 2f,50.

GROSS (T.). — Kritische Beiträge zur Energetik. II. Hermann v. Helmholtz u. die Erhaltung der Energie. In-8°, X p. et p. 59-236. Berlin, M. Krayn. 4f,40.

GUNDELFINGER (S.). — Sechsstellige Gaussische u. siebenstellige gemeine Logarithmen. 2., durch eine Ergänzungstabelle verm. Aufl. In-4°, IV-31 p. Leipzig, Veit u. Co. 3f,50.

HAMMER (E.). — Sechsstellige Tafel der Werte log. 10 $\frac{1+x}{1-x}$. Für jeden Wert des Arguments log. x von 3.0 — 10 bis 9.99000 — 10. (Vom Argument 9.99000 — 10 an bis 9.999700 — 10 sind die log $\frac{1+x}{1-x}$ nur noch fünfstellig angegeben, v. dort an vierstellig.) In-8°, IV-73 p. Leipzig, B. G. Teubner. 4f,50.

HASENÖHRL (F.). — Über das Gleichgewicht e. elastischen Kreiscylinders. (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 12 p. Vienne, C. Gerold's Sohn. 0f,40.

HECK (O.). — Die Natur der Kraft u. des Stoffs. (Begründung u. Fortentwicklung. der chem. Theorien.) In-8°, VII-94 p. Homberg, Th. M. Spamer. 1f,90.

HIPPAUF (D.). — Die Rectification u. Quadratur des Kreises. Eine Darbietung. In-8°, 32 p. et 4 pl. Breslau, W. G. Korn. 1f,90.

HOLZMÜLLER (G.). — Elemente der Stereometrie. 3 Tl. Die Untersuchung. u. Konstruktion schwierigerer Raumgebilde. Guldinsche Drehungskörper u. Drehungsflächen mit ihren Verallgemeinerungen, Schraubenflächen, Röhrenflächen u. ihren

Digitized by Google

Verallgemeinerungen, nebst ihren Inversionsverwandten. Krümmungslinien u. isotherm. Kurvenscharen auf diesen Flächen. Konforme Abbild. In-8°, XII-333 p. av. 126 fig. Leipzig, G. J. Göschen. 11f,25.

KANTOR (S.). — Theorie der vollständigen Systeme linearer Differentialgleichungen mit einem unabhängigen Veränderlichen. (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 72 p. Vienne, C. Gerold's Sohn. 1f,65.

—— Über einem neuen Gesichtspunkt in der Theorie des Pfaff'schen Problemes, der Functionengruppen u. der Berührungstransformationen. (Extr. du même recueil.) In-8°, 20 p. Vienne, C. Gerold's Sohn. 0f,50.

—— Über *l*-grediente Verwandtschaften im R_r, auf M_{r-1} auf Curven. (Extr. du même recueil.) In-8°, 21 p. Vienne, C. Gerold's Sohn. 0f,65

KLEIN (F.). — Anwendung der Differential - u. Integralrechnung auf Geometrie, eine Revison der Principien. Vorlesung, geh. während des Sommersem. 1901. Ausgearb. v. *C. Müller*. In-4°, VIII p. et 468 p. autogr. avec fig. Leipzig, B. G. Teubner. 12f,50.

KORN (A.). — Abhandlungen zur Potentialtheorie. 5. Hft. Über einen Satz v. Zaremba u. die Methode des arithmetischen Mittels im Raume. In-8°, XIV-66 p. Berlin, F. Dümmler. 2f,50. (Complet en 1 vol., 7f,50.)

—— Ueber den einfachsten semidefiniten Fall in der eigentlichen Variationsrechnung. (Extr. des *Sitzungsber. d. bayer. Akad. d. Wiss.*) In-8°, p. 75-90. Münich, G. Franz. 0f,50.

LOEWY (A.). — Ueber Differentialgleichungen, die m. ihren adjungirten zu derselben Art gehören. (Extr. du même recueil.) In-8°, p. 3-14. Münich, G. Franz. 0f,25.

MERTENS (F.). — Ein Beweis des Galois'schen Fundamentalsatzes. (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 21 p. Vienne, C. Gerold's Sohn. 0f,65.

NEUZEIT (K.-E.). — Mechanik des Aethers. Gegen die Irrlehren des Copernicus u. die materialistische Weltanschauung. In-8°, 31 p. avec 1 pl. Leipzig, R. Uhlig. 1 fr.

D'OCAGNE (M.-M.). — Construction de la tangente d'une certaine courbe. (Extrait d'une lettre adressée à M. A. Sucharda.) (Extr. des *Sitzungsber. d. böhm. Gesellsch. d. Wiss.*) In-8°, 2 p. av. 1 fig. Prague, F. Rivnác. 0f,10.

OTTO (F.-A.). — Ein Problem der Rechenkunst. Allgemeines Verfahren zur Bildung u. Auflösung v. Gleichungen mit einem

Digitized by Google

Unbekannten. (Beliebiger Grad u. jede Form.) 3. Aufl. In-8°, 56 p. Düsseldorf. 0f,65.

PERRY (N.). — Das Problem der conformen Abbildung f. eine specielle Kurve v. der Ordnung 3 n. (Extr. des *Sitzungsber. d. bayer. Akad. d. Wiss.*) In-8°, p. 13-54. Münich, G. Franz. 0f,50.

PETROVITCH (M.-M.). — Sur une classe d'équations différentielles du premier ordre. (Extr. des *Sitzungsber. d. böhm. Gesellsch. d. Wiss.*) In-8°, 20 p. Prague, F. Rivnác. 0f,40.

POGGENDORFF's (J.-C.) biographisch-literarisches Handwörterbuch zur Geschichte der exacten Wissenschaften. 4. Bd. (Die J. 1883 bis zur Gegenwart umfassend.) Hrsg. von Prof. Dr. *A. J. v. Oettingen.* (Paraîtra en 15 livraisons environ.) 1. Lfg. In-8°, p. 1-80. Leipzig, J. A. Barth. 3f,75.

PRINGSHEIM (A.). — Ueber die Divergenz gewisser Potenzreihen an der Convergenzgrenze. (Extr. des *Sitzungsber. d. bayer. Akad. d. Wiss.*) In-8°, p. 505-524. Münich, G. Franz. 0f,50.

SCHEFFERS (G.). — Anwendung der Differential- u. Integral-Rechnung auf Geometrie. 2. Bd. : Einführung in die Theorie der Flächen. In-8°, x-518 p. av. fig. Leipzig, Veit und Co. 16f,25.

SCHLESINGER (L.). — Über das Riemann'sche Problem der Theorie der linearen Differentialgleichungen. (Extr. des *Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 8 p. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

SCHUR (J.). — Über einen Satz aus der Theorie der vertauschbaren Matrizen. (Extr. du même recueil.) In-8°, 8 p. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

SCHWEITZER (R.). — Die Energie u. Entropie der Naturkräfte mit Hinweis auf den in dem Entropiegesetze liegenden Schöpferbeweis. In-8°, 59 p. Cologne, J. P. Bachem. 1f,50.

SOBOTKA (J.). — Axonometrische Darstellungen aus zwei Rissen u. Coordinatentransformationen. (Extr. des *Sitzungsber. d. böhm. Gesellsch d. Wiss.*) In-8°, 27 p. av. 2 pl. Prague, F. Rivnác. 1 fr.

—— Zur Konstruktion v. Krümmungskreisen u. Axen bei Kegelschnitten, welche durch 5 Punkte od. 5 Tangenten gegeben sind. (Extr. du même recueil.) In-8°, 19 p. av. 1 pl. Prague, F. Rivnác. 0f,80.

—— Zur Krümmung der Kegelschnittevoluten u. Konstruktion des Kegelschnittes durch 5 benachbarte Punkte e. ebenen Kurve. (Extr. du même recueil.) In-8°, 15 p. avec 1 pl. Prague, F. Rivnác. 0f,50.

STUDNICKA (F.-J.). — Eine neue Bedingung der Convergenz unendlicher Reihen. (Extr. du même recueil.) In-8°, 4 p. Prague, F. Rivnác. 0f,15.

Digitized by Google

Studnicka (F.-J.). — Ueber äussere u. innere Bipolardreiecke e. Systems v. 3 Kreisen. (Extr. du même recueil.) In-8°, 8 p. av. 1 fig. Prague, F. Rivnác. 0f,15.

—— Über die charakteristischen Eigenschaften der sogenannten gleichseitigen Ellipse. (Extr. du même recueil.) In-8°, 4 p. av. 1 fig. Prague, F. Rivnác. 0f,15.

Weber (E. v). — Zur Theorie der Kreisverwandtschaften in der Ebene. (Extr. des *Sitzungsber. d. bayer. Akad. d. Wiss.*) In-8°, p. 367-408. Münich, G. Franz. 0f,75.

Weierstrass (K.). — Mathematische Werke. IV. Bd. Vorlesungen über die Theorie der Abelschen Transcendenten. Bearb. v. *G. Hettner* u. *J. Knoblauch*. In-8°, xiv-632 p. Berlin, Mayer und Müller. 0f,50.

2° *Physique et Chimie.*

Assmann (R.). — Über die Existenz e. wärmeren Luftstromes in der Höhe von 10 bis 15 km. (Extr. des *Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 10 p. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

Bachmetjew (P.). — Der gegenwärtige Stand der Frage üb. elektrische Erdströme (Extr. des *Mém. de l'Acad. imp. des sciences de St-Pétersbourg.*) In-4°, 58 p. avec 6 pl. St-Pétersbourg. 3f,75.

Beilstein (F.). — Organische Chemie. 3. Aufl. Ergänzungsbde. Herausgegeben v. *P. Jacobson*. 17.-22. Lfg. Hambourg, Voss. Chaque livraison 2f,25.

Bernthsen (A.). — Kurzes Lehrbuch der organischen Chemie. 8. Aufl. In-8°, xviii-593 p. Braunschweig, F. Vieweg und Sohn. 12f,50.

Böttger (W.). — Grundriss der qualitativen Analyse vom Standpunkte der Lehre v. den Ionen. In-8°, xii-249-15 p. av. 10 fig. et 4 pl. Leipzig, W. Engelmann. 8f,75.

Elbs (K.). — Übungsbeispiele für die elektrolytische Darstellung chemischer Präparate. Zum Gebrauch im Laboratorium f. Chemiker u. Elektrochemiker. In-8°, viii-100 p. av. 8 fig. Halle, W. Knapp. 5 fr.

Erdmann (H.). — Lehrbuch der anorganischen Chemie. 3. Aufl. (5 — 8. Taus.). In-8°, xxxviii-788 p. av. 291 fig., 99 tabl. et 7 pl. Braunschweig, F. Vieweg und Sohn. 18f,75.

Exner (F.) u. E. Haschek. — Das Funken- u. Bogenspectrum des Europiums. (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 16 p. Vienne, C. Gerold's Sohn. 0f,50.

—— —— Über die ultravioletten Funkenspectra der Elemente.

Digitized by Google

(XX. Mittheilg.) (enth. die Spectra v. Tm, As, Se, S, P, O, N, H, Fl, Cl, Br, J, Ra, Po.) (Extr. du même recueil.) In-8°, 24 p. Vienne, C. Gerold's Sohn. 0f,65.

Fischer (E.) u. H. Leuchs. — Über Serin u. Isoserin. (Extr. des *Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 10 p. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

Fischer (F.) u. F. Weigert. — Synthese der *a*, ε — Diaminocapronsäure. (Extr. du même recueil.) In-8°, 6 p. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

Fritsche (H.). — Die tägliche Periode der erdmagnetischen Elemente. In-8°, 47 p. autogr. St-Pétersbourg. 5 fr.

Geitel (H.). — Ueber die Anwendung der Lehre v. den Gasionen auf die Erscheinungen der atmosphärischen Elektricität. Vortrag m. ergänz. Zusätzen u. Literaturnachweisen versehen. In-8°, 27 p. Braunschweig, F. Vieweg u. Sohn. 0f,75.

Giesel (F.). — Über radioaktive Substanzen u. deren Strahlen. (Extr. de *Samml. chem. u. chem.-techn. Vorträge.*) In-8°, 28 p. av. 4 fig. Stuttgart, F. Enke. 1f,50.

Glimm (E.). — I. Ueber die Constitution formaldehydschwefligsaurer Salze. II. Ueber die Affinitätsgrösse aromat. Oxyaldehyde. In-8°, 43 p. Freiburg i/B., Speyer u. Kaerner. 1f,50.

Graetz (L.). — Compendium der Physik. 3. verb. u. verm. Aufl. In-8°, IX-479 p. av. 275 fig. Vienne, F. Deuticke. 10 fr.

Grotowsky (H.). — Ueber das Phenylacetylacetophenon u. üb. Abkömmlinge des 1. 4 Benzopyronols. In-8°, 94 p. Tübingen, F. Pietzcker. 1f,90.

Gutbier (A.). — Studien üb. das Tellur. In-8°, 96 p. av. fig. Leipzig, C. L. Hirschfeld. 2f,50.

Hailer (E.). — Die Einwirkung v. Diazoverbindungen auf Acyl-1. 3-Ketosäureester. In-8°, 68 p. Tübingen, F. Pietzcker. 1f,50.

Hallerbach (W.). — Formeln, Moleculargewichte u. procentische Zusammensetzung chemischer Körper. Zusammengestellt u. berechnet. In-8°, III-108 p. Bonn, C. Georgi. 2f,50.

Hartmann (J.). — Spectrographische Geschwindigkeitsmessungen an Gasnebeln. (Extr. des *Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 8 p. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

Häussermann (J.). — Ueber die Produkte der Chlorwasserstoffentziehung aus Säurechloriden unter besonderer Berücksichtigung der Einwirkung tertiärer Basen. In-8°, 60 p. Tübingen, F. Pietzcker. 1f,50.

Henniger (K.-A.). — Chemisch-analytisches Praktikum behufs

Digitized by Google

Einführung in die qualitative Analyse. In-8°, VIII-127 p. Braunschweig, F. Vieweg u. Sohn. 1f,90.

HINTZ (E.). — Chemische u. physikalisch chemische Untersuchung des Rhenser Sprudels zu Rhens bei Coblenz am Rhein. Ausgeführt im chem. Laboratorium Fresenius. Unter Mitwirkg. v. *L. Grünhut*. In-8°, 38 p. Wiesbaden, C. W. Kreidel. 1f,50.

JAGER (G.). — Die Energie der fortschreitenden Bewegung der Flüssigkeitsmolekeln. (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 5 p. Vienne, C. Gerold's Sohn. 0f,25.

KAYSER (H.). — Handbuch der Spectroscopie. 2. Bd. In-8°, XI-696 p. av. 57 fig. et 4 pl. Leipzig, S. Hirzel. 50 fr.

KITT (M.). — Die Jodzahl der Fette u. Wachsarten. In-8°, VII-70 p. Berlin, J. Springer. 3 fr.

KLEIN (C.). — Optische Studien. II. (Extr. des *Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 16 p. av. fig. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

KOEPPEN (A.). — Ueber das Nonodilacton. In-8°, 32 p. Strasbourg, Schlesier u. Schweikhardt. 1 fr.

KOHLRAUSCH (F.). — Über die Temperaturcoefficienten der Ionen im Wasser, insbesondere über e. die einwerth. Elemente umfass. Gesetz. (Extr. des *Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 9 p. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

KOHLRAUSCH (F.) u. H. v. STEINWEHR. — Weitere Untersuchungen üb. das Leitvermögen v. Elektrolyten aus einwerthigen Ionen in wässeriger Lösung. (Extr. du même recueil.) In-8°, 7 p. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

KORN (A.). — Ueber die natürliche, elektrische Belegung einer beliebigen, stetig gekrümmten Konduktoroberfläche. (Extr. des *Sitzungsber. d. bayer. Akad. d. Wiss.*) In-8°, p. 425-434. Munich, G. Franz. 0f,25.

KÖTHNER (P.). — Studien über Tellur. (Extr. de la *Zeitschr. f. Naturwiss.*) In-8°, 12 p. av. 1 pl. double. Stuttgart, E. Schweizerbart. 0f,65.

KUTSCHER (F.). — Zur Kenntniss der Amidosäuren der Reihe $C_nH_{2n+1}NO_2$. (Extr. des *Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 5 p. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

LASSAR-COHN. — Arbeitsmethoden f. organisch-chemische Laboratorien. Ein Handbuch f. Chemiker, Mediziner u. Pharmazeuten. 3., vollständig umgearb. u. verm. Aufl. Spezieller Tl. 2. Abschn. In-8°, IV p. et p. 437-716 av. 2 fig. Hambourg, L. Voss. 8f,75.

LERCH (F. v.). — Über die Abhängigkeit der Polarisation v. Stromdichte u. Temperatur. (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. d.*

Digitized by Google

Wiss.) In-8°, 26 p. avec 4 fig. Vienne, C. Gerold's Sohn. 0f,90.

LINDEMANN (F.). — Zur Theorie der Spectrallinien. (Extr. des *Sitzungsber. d. bayer. Akad. d. Wiss.*) In-8°, p. 441-494. Munich, G. Franz. 1 fr.

LUMMEL (E. v.). — Lehrbuch der Experimentalphysik. 8. u. 9. neubearb. Aufl., hrsg. v. *W. König*. In-8°, x-592 p. av. 1 portr., 429 fig. et 1 pl. Leipzig, J. A. Barth. 8 fr.

LUMMER (O.) u. E. GEHRCKE. — Über den Bau der Quecksilberlinien, ein Beitrag zur Auflösung feinster Spectrallinien. (Extr. des *Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 7 p. av. 1 fig. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

MACHE (H.). — Über die Zerstreuung der Elektricität in abgeschlossener Luft. (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 5 p. Vienne, C. Gerold's Sohn. 0f,25.

MEDICUS (L.). — Einleitung in die chemische Analyse. 2. Hft. Kurze Anleitung zur Massanalyse. Mit spezieller Berücksicht. der Vorschriften des Arzneibuches bearb. 7. u. 8., verb. u. verm. Aufl. In-8°, XII-171 p. Tübingen, H. Laupp. 3 fr.

MEUSEL (E.). — Die Zusammensetzung der chemischen Elemente, theoretisch u. experimentell unter Beweis gestellt. In-8°, VII-83 p. Liegnitz, C. Seyffarth. 3f,75.

MEYER (S.). — Notiz über das magnetische Verhalten v. Europium, Samarium u. Gadolinium. (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 4 p. Vienne, C. Gerold's Sohn. 0f,15.

MOEHLMANN (A.). — Ueber Ausstrahlung hochgespannter Wechselströme v. hoher Frequenz aus Spitzen. In-8°, 40 p. av. 3 pl. Freiburg i. B., Speyer u. Kaerner. 2f,50.

OSTWALD (W.). — Über Katalyse. Vortrag. In-8°, 32 p. Leipzig, S. Hirzel. 0f,75.

PILGRIM (L.). — Einige Aufgaben der Wellen- u. Farbenlehre des Lichts. In-4°, 69 p. av. fig. et 2 pl. color. Cannstatt, H. Reitzel. 3f,75.

PLANCK (M.). — Zur elektromagnetischen Theorie der Dispersion in isotropen Nichtleitern. (Extr. des *Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 25 p. Berlin, G. Reimer. 1f,25.

PREU (F.). — Beiträge zur Kenntniss der Bornylamine. In-8°, 73 p. Leipzig, A. Warnecke. 1f,65.

PRZIBRAM (K.). — Photographische Studien über die elektrische Entladung. (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 4 p. Vienne, C. Gerold's Sohn. 0f,15.

REIS (F.). — Zur Kenntnis der Condensationsprodukte der α-Ke-

Digitized by Google

tonsäuren u. ihrer Umwandlungsprodukte. In-8°, 56 p. Strasbourg, J. Singer. 1f,25.

Röhm (O.). — Ueber Polymerisationsprodukte der Akrylsäure. In-8°, 34 p. Tübingen, F. Pietzcker. 1 fr.

Ruhmer (E.). — Neuere elektrophysikalische Erscheinungen. Nach zahlreichen Einzelveröffentlichungen zusammengestellt. In-8°, IV-163 p. av. 171 fig. Berlin, Administration der Fachzeitschrift *Der Mechaniker*. 5 fr.

Runge (C.) u. F. Paschen. — Über die Strahlung des Quecksilbers im magnetischen Felde. (Extr. des *Abhandlgn. d. preuss. Akad. d. Wiss.*) In-4°, 18 p. av. fig. et 6 pl. Berlin, G. Reimer. 3f,75.

—— Über die Zerlegung einander entsprechender Serienlinien im magnetischen Felde. (Extr. des *Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 7 p. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

Schaumann (G.). — Beiträge zur Jodometrie der Superoxyde. In-8°, 39 p. Freiburg i. B., Speyer u. Kaerner. 1f,25.

Schlink (W.). — Über die Deformation v. Häuten rhombischer Struktur unter Einwirkung v. Umfangskräften, die in der Ebene der Haut liegen. In-8°, 77 p. av. 14 pl. Neuwied, Heusers. 2f,50.

Schlotterbeck (F.). — Über das Anilin-azo-acetylaceton u. seine Abkömmlinge. Ein Beitrag zur Kenntnis der « gemischten Azoverbindungen ». In-8°, 50 p. Tübingen, F. Pietzcker. 1f,25.

Schmidt (E.). — Anleitung zur qualitativen Analyse. 5. Aufl. In-8°, IV-80 p. Halle, Tausch u. Grosse. 3f,50.

Siegrist (J.). — Chemische Affinität u. Energieprinzip. (Extr. de *Sammlg. chem. u. chemisch-techn. Vorträge.*) In-8°, 22 p. Stuttgart, F. Enke. 1f,50.

Stanzel (K.). — Über die Diffusion in sich selbst. (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 15 p. Vienne, C. Gerold's Sohn. 0f,50.

Springer (E.). — Der Alkaloidnachweis. Kritisch-experimentelle Beiträge zur analytischen toxikologischen Chemie der Alkaloide. In-8°, III-147 p. av. 6 pl. Breslau, W. Koebner. 2f,50.

Staub (J.-B.). — Der Mechanismus des Magnetismus. (Extr. de *Die naturgemässe Erklärung der Bewegung.*) In-8°, 16 p. Leipzig, A. Strauch. 0f,50.

—— Der Magnetismus als Universalfaktor im Weltenbau. Eine v. Grund aus neue naturharmon. Erklärung der Ursache der Bewegung u. Formirung des Universums. In-8°, 20 p. Leipzig, G. Schlemminger. 0f,65.

Strouhal (V.). — Analytische Darstellung der Lissajous-schen Fi-

Digitized by Google

guren. (Extr. des *Sitzungsber. d. böhm. Gesellsch. d. Wiss.*) In-8°, 26 p. av. 7 fig. Prague, F. Rivnác. 0f,50.

TREADWELL (E.-P.). — Kurzes Lehrbuch der analytischen Chemie in 2 Bdn. 1. Bd. Qualitative Analyse. 2. Aufl. In-8°, XIII-432 p. av. 14 fig. et 1 pl. Vienne, F. Deuticke. 10 fr.

WARBURG (E.). — Über spontane Desozonisirung. (Extr. des *Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 14 p. av. 1 fig. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

WOLFRUM (A.). — Chemisches Praktikum. 1. Tl. Analytische Übungen. In-8°, XVII-562 p. av. 25 fig. Leipzig, W. Engelmann. 12f,50.

3° *Minéralogie. — Géologie. — Paléontologie.*

BARRANDE (J.). — Système silurien du centre de la Bohême. Ire partie : Recherches paléontologiques. Continuation éditée par le Musée Bohême. Vol. VIII. Tome II. In-4°, VIII-347 p. et 99 pl. Prague. 125 fr.

BECKER (O.). — Die Eruptivgesteine des Niederrheins u. die darin enthaltenen Einschlüsse. In-8°, III-99 p. Bonn, F. Cohen. 3 fr.

BURGERSTEIN (A.). — Mikroskopische Untersuchung prähistorischer Hölzer des k. k. naturhistorischen Hofmuseums in Wien. (Extr. des *Annalen d. k. k. naturhistor. Hofmuseums.*) In-8°, p. 169-177. Vienne, A. Hölder. 0f,50.

Carte géologique internationale de l'Europe, sous la direction de Beyrich, Hauchecorne, Beyschlag. 1 : 1.500.000. 4e livr. 7 Blatt. Berlin, D. Reimer. 20 fr.

CVIJIC (J.). — Die dinarisch-albanesische Scharung. (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 42 p. av. 1 carte en coul. Vienne, C. Gerold's Sohn. 1f,40.

—— Die tektonischen Vorgänge in der Rhodopemasse. (Extr. du même recueil.) In-8°, 24 p. av. 1 pl. et 1 carte color. Vienne, C. Gerold's Sohn. 1f,25.

EGGER (J.-G.). — Der Bau der Orbitolinen u. verwandter Formen. Eine Studie mit e. Anh. von *F. Broili :* Ueber die Fauna der Orbitolinen führenden Schichten der untersten Kreide in der Krim. (Extr. des *Abhandl. d. bayer. Akad. d. Wiss.*) In-4°, p. 575-610 av. 7 pl. Munich, G. Franz. 3 fr.

ETZOLD (F.) u. O. WITTIG. — Geologischer Querschnitt durch Sachsen vom Südabhange des Erzgebirges bis Leipzig. Carte en coul. 7f,50. Texte in-8° de 22 p. 0f,65. Leipzig, Dürr'sche Buchhandlung.

Digitized by Google

Fuchs (A.). — Über neuere Beobachtungen im Unterdevon der Loreleigegend (Mittelrhein). (Vorläufige Mittheilg.) (Extr. du *Jahrb. d. nass. Ver. f. Naturkunde.*) In-8°, p. 41-49. Wiesbaden, J. F. Bergmann. 0f,75.

Gaebler (C.). — Kritische Bemerkungen zu Fritz Frech « die Steinkohlenformation », Lieferung II u. III der Lethaea palaeozoica. In-8°, 24 p. Kattowitz, G. Siwinna. 1f,90.

Haas (H.). — Katechismus dei Geologie. 7. verm. u. verb. Auflage. In-12°, XII-243 p. av. 186 fig. Leipzig, J. J. Weber. 4f,40.

Halen (J. van). — Was muss man v. der Geologie wissen ? Allgemeinverständlich geschildert. In-8°, 64 p. Berlin, H. Steinitz. 1f,25.

Hoernes (R.). — Neue Cerithien aus der Formengruppe der Clava bidentata (Defr.) Grat. v. Oisnitz in Mittelsteiermark, nebst Bemerkungen üb. die Vertretung dieser Gruppe im Eocän, Oligocän u. Miocän (in mediterranen u. sarmat. Schichten). (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 30 p. av. 1 pl. Vienne, C. Gerold's Sohn. 1 fr.

Hoff (J.-H van't). — Untersuchungen über die Bildungsverhältnisse der oceanischen Salzablagerungen, insbesondere des Stassfurter Salzlagers. (Extr. des *Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss.*) XXIV-XXVI. In-8°. Berlin, G. Reimer. Chaque fascicule 0f,65.

Holtheuer (R.). — Das Thalgebiet der Freiberger Mulde. Geologische Wanderskizzen u. Landschaftsbilder. In-8°, x-124 p. Leipzig, W. Engelmann. 1f,90.

Kalender f. Geologen, Paläontologen u. Mineralogen, hrsg. v. *P. Krusch.* 5. Jahrg. 1902. Mit 11 Uebersichtstableaus der geol. Aufnahmen. In-12, IV-348 p. Berlin, Gebr. Borntraeger. 4f,40.

Katzer (F.). — Geologie v. Böhmen. Der geognost. Aufbau u. die geolog. Entwickelung des Landes m. besond. Berücksicht. des Erzvorkommens u. der verwendbaren Minerale u. Gesteine. Gr. in-8°, XXII-1606 p. avec 1068 fig., cartes, portraits et une gr. carte géol. en coul. Prague, I. Taussig. 30 fr.

Koken (E.). — Palaeontologie u. Descendenzlehre. Vortrag. In-8°, 33 p. av. 6 fig. Iéna, G. Fischer. 1f,25.

Linck (G.). — Tabellen zur Gesteinskunde, f. Geologen, Mineralogen, Bergleute, Chemiker, Landwirthe u. Techniker zusammengestellt. In-8°, 8 tabl. av. 3 pl. et III-1 p. de texte. Iéna, H. Fischer. 2f,50.

Lorenz v. Liburnau (L.). — Über Hadropithecus Stenognathus Lz., nebst Bemerkungen zu einigen anderen ausgestorbenen

Digitized by Google

Primaten v. Madagaskar. (Extr. des *Denkschr. d. k. Akad. d. Wiss.*). In-4°, 12 p. avec 2 pl. Vienne, C. Gerold's Sohn. 2f,50.

Mitteilungen der Erdbeben-Commission der kaiserl. Akademie der Wissenschaften in Wien. Neue Folge. Nr. VI-VIII. (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-8°, IV-56 p. av. 1 fig. et 2 cartes; IV-115 p., 36 p. Vienne, C. Gerold's Sohn. 2 fr.; 2f,65 : 1 fr.

Mitteilungen der grossherzogl. badischen geologischen Landesanstalt, hrsg. im Auftrage des Ministeriums des Innern. 4. Bd. 3. Hft. In-8°, p. 253-395 av. 1 carte. Heidelberg, C. Winter. 3 fr.

MÖLLER (H.). — Ueber « Feuerstätten » im Kalktuffsand v. Taubach u. über die geologische Stellung der Weimar-Taubacher Kalktufflager. (Extr. de la *Zeitschr. f. Naturviss.*) In-8°, 36 p. avec 1 pl. double. Stuttgart, E. Schweizerbart. 0f,75.

NOPESA jun. (F.). — Dinosaurierreste aus Siebenbürgen. II. (Schädelreste v. Mochlodon.) Mit e. Anh. : Zur Phylogenie der Ornithopodiden. (Extr. des *Denkschr. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-4°, 27 p. av. 11 fig. et 2 pl. Vienne, C. Gerold's Sohn. 3f,40.

REISS (W.) u. A. STÜBEL. — Reisen in Süd-Amerika. Das Hochgebirge der Republik Ecuador. II. Petrographische Untersuchungen. 2. Ost-Cordillere. Bearb. im mineralogisch-petrograph. Institut der Universität Berlin. 2. Lfg. (Schluss.) In-4°, IX p. et p. 61-356 av. 4 pl. Berlin, A. Asher u. Co. 25 fr.

Sammlungen des geologischen Reichs-Museums in Leiden. I. Beiträge zur Geologie Ost-Asiens u. Australiens. Mit Unterstützung des niederländ. Ministeriums der Colonien hrsg. v. *K. Martin.* VI. Bd. 5. Hft. In-8°, V p. et p. 249-360, avec 1 pl. Leyde, E. J. Brill. 2f,50.

SAPPER (K.). — Geologische Karte der Alta Verapaz, nach eigenen Aufnahmen aus den J. 1888-1900 entworfen. 1 : 200.000. (Extr. des *Mitth. d. geograph. Gesellsch. in Hamburg.*) Hambourg, L. Friederichsen u. Co. 5 fr.

SARASIN (P.) u. F. SARASIN. — Materialien zur Naturgeschichte der Insel Celebes. 4. Bd. Entwurf e. geographisch-geolog. Beschreibung der Insel Celebes. In-4°, XI-344-28 p. av. fig., 11 pl. et 3 cartes. Wiesbaden, C. W. Kreidel. 62f,50.

SCHAFFER (F.). — Neue geologische Studien im südöstlichen Kleinasien (ausgeführt auf e. Reise im Sommer 1901). (Extr. des *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 15 p. av. 2 fig. Vienne, C. Gerold's Sohn. 0f,50.

Spezialkarte, geologische, des Königr. Sachsen. 1 : 25.000. Hrsg.

Digitized by Google

vom k. Finanzministerium. Bearb. unter der Leitung v. *H. Credner*. Blatt 138. Leipzig, W. Engelmann. 3f,75.

Tornquist (A.). — Geologischer Führer durch Ober-Italien. I. Das Gebirge der ober-italien. Seen. Mit Beiträgen v. *A. Baltzer* u. *C. Porro*. In-12, xvi-302 p. av. 30 fig. Berlin, Gebr. Borntraeger. 6f,90.

—— Über mesozoische Stromatoporiden. (Extr. des *Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 9 p. av. 3 fig. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

Übersichtskarte, geologische, der Königreiche Kroatien u. Slavonien, hrsg. durch die k. kroatisch-slavon.-dalmat. Landesregierung, Section f. innere Angelegenheiten. Aufgenommen u. bearb. v. *Dragutin Gorjanovic Kramberger*. 1 : 75.000. (In deutscher u. kroat. Sprache.) 1. Lfg. Zone 20, Col. XIV. Pettau u. Vinica. Mit Erläuterungen. In-8°, 31 p. av. fig. Agram, L. Hartman. 5 fr.

Vater (H.). — Tabellarische Uebersicht über die wichtigeren Mineralien. Für die Vorträge über Mineralogie an der königl. sächs. Forstakademie zu Tharandt zusammengestellt. 2. Aufl. In-8°, 27 p. Freiberg, Craz u. Gerlach. Tharandt, Akadem. Buchh. 0f,95.

Voeltzkow (A.). — Über Coccolithen u. Rhabdolithen nebst Bemerkungen üb. den Aufbau u. die Entstehung der Aldabra-Inseln. (Extr. des *Abhandl. d. Senckenberg. naturforsch. Gesellsch.*) In-4°, p. 465-537 av. 3 fig. Frankfurt a. M., Diesterweg. 3f,75.

Walther (J.). — Geologische Heimatskunde v. Thüringen. In-8°, viii-176 p. av. 43 fig. et 16 profils. Iéna, G. Fischer. 3 fr.

Weber (C.-A.). — Über die Vegetation u. Entstehung des Hochmoors v. Augstumal im Memeldelta, m. vergleich. Ausblicken auf andere Hochmoore der Erde. Eine formationsbiologisch-histor. u. geolog. Studie. In-8°, viii-252 p. av. 29 fig. et 3 pl. Berlin, P. Parey. 8f,75.

Weismann (A.). — Vorträge über Descendenztheorie. 2 Bde. In-8°, xii-456 p. et vi-462 p. av. 131 fig. et 3 pl. Iéna, G. Fischer. 25 fr.

Wiesbaur (J.-B.). — Theralith im Duppauer Gebirge. (Extr. des *Sitzungsber. d. deut. naturw.-medicin. Vereines f. Böhmen : Lotos.*) In-8°, 10 p. Teplitz-Schönau, A. Becker. 0f,65.

Digitized by Google

4° *Mécanique appliquée et Machines.*

Bach (C.). — Elasticität u. Festigkeit. Die f. die Technik wichtigsten Sätze u. deren erfahrungsmäss. Grundlage. 4. Aufl. In-8°, xxii-650 p. av. fig. et 18 pl. Berlin, J. Springer. 22f,50.

—— Versuche über die Widerstandsfähigkeit v. Kesselwandungen. 6. Hft. Die Widerstandsfähigkeit kugelförmigen Wandungen gegenüber äusserem Ueberdruck. (Extr. de la *Zeitschr. d. Ver. deut. Ingen.*) In-4°, 15 p. av. fig. Berlin, J. Springer. 2f,50.

Bauer (G.). — Berechnung u. Konstruktion der Schiffsmaschinen u. Kessel. Ein Handbuch zum Gebrauch f. Konstrukteure, Seemaschinisten u. Studierende, unter Mitwirkung der Ingenieure *E. Ludwig*, *A. Boettcher* u. *H. Foettinger*. In-8°, xvi-663 p. av. 500 fig., 11 pl. et plus. tableaux. Munich, R. Oldenbourg. 21f,90.

Cranz (C.) u. K.-R. Koch. — Untersuchung über die Vibration des Gewehrlaufes. (Schluss.) II. Schwingungen in horizontaler Ebene. (Extr. des *Abhandl. d. bayer. Akad. d. Wiss.*) In-4°, p. 559-274 av. 1 fig. et 3 pl. Munich, G. Franz. 1 fr.

Gaubichler (M.). — Eine Skizzen-Sammlung aus der Praxis, für die Praxis zur Kalkulation u. Ausführung v. Maschinen, Kessel- u. Walzwerks-Bestandteilen, etc. Texte et Atlas. In-4°, 125 p. et 92 pl. Mittweida, Polytechn. Buchh. 15 fr.

Grove (O. v.). — Formeln, Tabellen u. Skizzen für das Entwerfen einfacher Maschinentheile. 13. Aufl. In-fol., v p. et 76 pl. Leipzig, S. Hirzel. 8f,75.

Haeder (H.). — Die Dampfmaschinen unter hauptsächlichster Berücksichtigung kompletter Dampfanlagen sowie marktfähiger Maschinen. Für Praxis u. Schule bearb. 6. neubearb. Aufl. 3 Bde. In-8°, xvi-607 p. In-4°, 94 p. et 76 p. de dessins av. 4 p. de texte. In-8°, 700 fig., 78 tabl. et 16 pl. Duisburg. Düsseldorf, L. Schwann. 35 fr.

Hartleib (O.). — Kalkulationspreise f. die Industrie mit besonderer Rücksicht auf den Maschinenbau. In-8°, vi-387 p. Berlin, G. Siemens. 11f,25.

Isendahl (W.). — Maschinentechnisches Wörterbuch in 3 Sprachen mit besonderer Rücksicht auf Automobilismus u. Elektrotechnik. Französisch-deutsch-englisch. In-12, iv-176 p. Berlin, G. Siemens. 2f,50.

Reichel (E.). — Der Turbinenbau auf der Weltausstellung in

Digitized by Google

Paris 1900. (Extr. de la *Zeitschr. d. Vereins deut. Ingen.*) In-4°, 44 p. av. 146 fig. Berlin, J. Springer. 2f,50.

SCHNEIDER (M.). — Die Maschinen-Elemente. Ein Hilfsbuch f. technische Lehranstalten, sowie zum Selbststudium geeignet. Mit Beispielen u. zahlreichen Zeichnungen im Text wie auf Tafeln. (In 2 Bdn.) 3. u. 4. Lfg. In-4°, p. 27-54, avec 34 pl. Braunschweig, F. Wieweg u. Sohn. 7f,50.

SCHÖTTLER (R.). — Die Gasmachine. Ihre Entwickelung, ihre heutige Bauart u. ihr Kreisprocess. 4. umgearb. Aufl. 2 Bde. In-8°, XI-400 p. av. 411 fig. et 42 pl. Braunschweig, B. Goeritz. 23f,75.

SCHWIDTAL. — Technische Mechanik, nebst einem Abriss der Festigkeitslehre f. Bergschulen u. andere technische Lehranstalten. In-8°, VI-76 p. av. 78 fig. Leipzig, J. Baedeker. 1f,90.

SIEDEK (R.). — Die natürlichen Normalprofile der fliessenden Gewässer. Vortrag. (Extr. de la *Zeitschr. d. öst. Ingenieur- u. Architekten-Vereines.*) In-8°, 21 p. av. 2 pl. Vienne, W. Braumüller. 1f,75.

SIMERKA (V.). — Dampfkessel u. Dampfmaschinen u. ihre Wartung. 5. verb. u. verm. Ausg. Mit. e. Anh., enth. die Gesetze u. Verordngn. üb. Dampfkessel. In-8°, VII-256 p. av. 90 fig. Pilsen, W. Steinhauser. 3f,50.

WOTRUBA (R.). — Die Grundlehren der mechanischen Wärmetheorie u. ihre elementare Anwendung in den hauptsächlichsten Gebieten der Technik. In-8°, VI-282 p av. 115 fig. Berlin, H. Costenoble. 12f,50.

5° *Applications industrielles de la physique et de la chimie. — Métallurgie.*

ARNOLD (E.). — Die Gleichstrommaschine. Theorie, Konstruktion, Berechnung, Untersuchung u. Arbeitsweise derselben. 1. Bd. Die Theorie der Gleichstrommaschine. In-8°, XVI-555 p. av. 421 fig. Berlin, J. Springer. 20 fr.

BLASCHKE (P.). — Wörterbuch der Elektrotechnik in drei Sprachen. Mit e. Vorwort v. Chefelektr. Dr. *F. Niethammer*. 2. Tl. Französisch-Deutsch-Englisch. In-8°, VIII-144 p. Leipzig, S. Hirzel. 6f,25.

BRADWELL (J.-P.). — Dynamo-Maschinen. 9. Hft. Potsdam, A. Stein. 1f,90.

EMDE (F.). — Die Arbeitsweise der Wechselstrommaschinen. In-8°, VIII-93 p. Berlin, J. Springer. 3f,75.

Digitized by Google

Handbuch der chemischen Technologie. Bearb. u. hrsg. v. *P.-A. Bolley* u. *K. Birnbaum*. Fortgesetzt v. Dr. *E. Engler*. V. Bd., 2. Gruppe. 3. Lfg. (63. Lfg.) In-8°, p. 385-576. Braunschweig, F. Vieweg u. Sohn. 7f,50.

Holzt (A.). — Schule d. Elektrotechnikers. Ergänzgsbd. 3. u. 4. Hft. Leipzig, M. Schäfer. Chaque fascicule, 0f,95.

Jacobsen (E.). — Chemisch-technisches Repertorium. 40. Jahrg. 1901. I. Halbj. 2. Hlfte. u. II. Halbj. 1. Hlfte. Berlin, Gaertner. 10f,75.

Jüptner (H. v.). — Grundzüge der Siderologie. 2. Tl. Zusammenhang zwischen therm. u. mechan. Bearbeitung, Konstitution u. Eigenschaften der Eisenlegierungen. In-8°, viii-408 p. av. 16 fig. et 22 pl. Leipzig, A. Felix. 22f,50.

Kapp (G.). — Elektromechanische Konstruktionen. Eine Sammlung v. Konstruktionsbeispielen u. Berechnungen v. Maschinen u. Apparaten f. Starkstrom. Zusammengestellt u. erläutert. 2., verb. u. erweit. Aufl. In-4°, viii-292 p. avec 114 fig. et 36 pl. Berlin, J. Springer. 25 fr.

Kratzert (H.). — Grundriss des Elektrotechnik. Für den prakt. Gebrauch f. Studierende der Elektrotechnik u. zum Selbststudium. II. Thl., 4. u. 5. Buch. 2. Aufl. In-8°, x-207 p. av. 94 fig.; vi-75 p. av. 44 fig. Vienne, F. Deuticke. 6f,25; 3f,15.

Krause (R.). — Anlasser u. Regler f. elektrische Motoren u. Generatoren. Theorie, Konstruktion, Schaltung. In-8°, iv-92 p. av. 97 fig. Berlin, J. Springer. 5 fr.

Ledebur (A.). — Handbuch der Eisenhüttenkunde. Für den Gebrauch im Betriebe wie zur Benutzung beim Unterrichte bearb. 4., neu bearb. Aufl. 1. Abth.: Einführung in die Eisenhüttenkunde. In-8°, iv-381 p. av. fig. Leipzig, A. Felix. 15 fr.

Marcher (T.). — Experimentelle Untersuchungen auf dem Wechselstromgebiete. (Extr. de *Samml. elektrotechn. Vorträge.*) In-8°, 30 p. av. 49 fig. Stuttgart, F. Enke. 1f,50.

Partheil (G.). — Die drahtlose Telegraphie. Nach seinen Vorträgen im Verein f. Landeskunde u. Naturwissenschaften zu Dessau sowie im elektrotechn. Verein zu Leipzig allgemein verständlich dargestellt. In-8°, 47 p. Berlin, Gerdes u. Hödel. 1f,50.

Prasch (A.). — Die Telegraphie ohne Draht. In-8°, xv-268 p. av. 202 fig. Vienne, A. Hartleben. 6f,25.

Rehbein (E.). — Einrichtung u. Behandlung der Dynamo-Maschine. In-8°, 19 p. av. 14 fig. Leipzig, S. Schnurpfeil. 0f,65.

Rosenberg (E.). — Elektrische Starkstrom-Technik. Eine leicht-

Digitized by Google

fasslige Darstellung. In-8°, VII-296 p. av. 284 fig. Leipzig, O. Leiner. 8f,75.

SCHIEMANN (M.). — Die elektrischen Autbahnen. Gleislose Motorbahnen m. elektr. Stromzuführung. Ein neues Verkehrsmittel, e. neuer Industriezweig, e. neue Kapitalsanlage. In-8°, 35 p. av. fig. Leipzig, O. Leiner. 0f,95.

SCHOLLMEYER (G.). — Schule der Elektrizität. Praktisches Handbuch der gesamten Elektrizitätslehre. Unter Berücksicht. der neuesten Forschungen u. Erfindungen. In-8°, VII-323 p. av. 117 fig. Neuwied, Heuser. 6f,25.

WEBER (C.-L.). — Erläuterungen zu den Vorschriften f. die Errichtung v. elektrischen Starkstromanlagen. (Sicherheitsvorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker.) 4., verm. u. verb. Ausg. In-8°, XII-228 p. Berlin, J. Springer. 3f,75.

WEDDING (H.). — Ausführliches Handbuch der Eisenhüttenkunde. 2. vollkommen umgearb. Aufl. v. des Verf. Bearbeitg. v. « Dr. John Percy's Metallurgy of iron and steel ». (In 4 Bdn.) 2. Bd. Die Grundstoffe der Eisenerzeugung. 4. Lfg. In-8°, III p., p. XXI-XXVIII et p. 817-1217. av. nombreuses fig. et planches. Braunschweig, F. Vieweg u. Sohn. 18f,75.

WIETZ (H.) u. C. ERFURTH. — Hilfsbuch f. Elektropraktiker. 3. Aufl. In-12, VIII-436 p. av. 327 fig. et 1 carte. Leipzig, Hachmeister u. Thal. 3f,75.

WILKE (A.). — Der elektrotechnische Beruf. Eine kurzgefasste Darstellung des Bildungsganges u. der Aussichten des Elektrotechnikers, des Elektrochemikers u. der elektrotechnischen Gewerbtreibenden, nebst Nachweis üb. die besteh. Anstalten f. Ausbildung der Elektrotechniker. 3. verm. Aufl. In-8°, VIII-127 p. Leipzig, O. Leiner. 2f,50.

ZACHARIAS (J.). — Elektrische Verkehrstechnik. Handbuch f. Entwurf. u. Bau elektr. Strassenbahnen u. damit verbundener Betriebe. In-8°, XI-285 p. av. 32 fig. et 1 pl. Berlin, H. Costenoble. 15 fr.

6° *Exploitation des mines. — Gîtes minéraux.*

Bergbaue Steiermarks. Hrsg. unter Mitwirkung mehrerer Fachgenossen v. *K. A. Redlich*. I. In-8°, 18 p. av. 1 pl. (Extr. de l'*Oesterr. Zeitschr. f. Berg- u. Hüttenwesen.*) Leoben, L. Nüssler. 1f,25.

Bergreviere, die neuen, des Oberbergamtsbez. Dortmund nach

Digitized by Google

der Feststellung vom 6. XII. 1901, gültig seit 1. I. 1902. In-8°, 31 p. Essen, G. D. Baedeker. 0f,25.

Bericht über den VIII. allgemeinen deutschen Bergmannstag zu Dortmund vom 11. bis 14. IX. 1901. Hrsg. v. der Red. der Zeitschrift *Glückauf* unter Mitwirkung des vorbereit. Ausschusses. In-8°, IV-270 p. av. fig. et 15 pl. Berlin, J. Springer. 18f,75.

Erhard (T.). — Der elektrische Betrieb im Bergbau. Die Eigenschaften der elektrischen Maschinen u. ihre Anwendung in der Grube m. besonderer Berücksichtigung der Betriebssicherheit. Ein Leitfaden f. Betriebsbeamte. In-8°, VII-154 p. av. 31 fig. Halle, C. O. Lehmann. 6f,25.

Festschrift am VIII. Bergmannstag in Dortmund den 11.-14. sept. 1901. In-4°, 338 p. et 17 pl. Berlin, J. Springer. 18f,75.

Franke (G.). — Über Versuche m. Acetylen-Beleuchtung in Bergwerken. (Extr. de la *Zeitschr. f. d. Berg-, Hütten- u. Salinen-Wesen im preuss. Staate.*) In-4°, 15 p. Berlin, W. Ernst u. Sohn. 1f,25.

Hrabak (J.). — Die Drahtseile. Alles Nothwendige zur richt. Beurtheilung, Construction u. Berechnung derselben. Eine der Praxis angepasste wissenschaftl. Abhandlung. In-8°, XV-220 p. av. 72 fig. et 14 pl. Berlin, J. Springer. 12f,50.

Hundt (R.). — Bergarbeiter-Wohnungen im Ruhrrevier. Hrsg. v. dem Verein f. die bergbaul. Interessen im Oberbergamtsbez. Dortmund. In-8°, 84 p. av. fig. et 14 pl. Berlin, J. Springer. 6f,25.

Kubierschky (K.). — Über ein eigenthümliches Salzvorkommen im sogenannten Magdeburg-Halberstädter Becken. Mit e. Nachtrag, von *J. H. van't Hoff.* (Extr. des *Sitzungsber. d. preuss. Akad. d. Wiss.*) In-8°, 12 p. av. 1 fig. Berlin, G. Reimer. 0f,65.

Lemberg (H.). — Die Steinkohlenzechen des niederrheinisch-westfälischen Industriebezirks. Nach zuverläss. Quellen bearb. u. hrsg. 8. Aufl. In-8°, IV-117 p. Dortmund, C. L. Krüger. 3f,75.

Mitteilungen aus dem Markscheiderwesen. Neue Folge. Vereinsschrift des deutschen Markscheidervereins. Im Auftrage u. unter Mitwirkung des Vereinsvorstandes hrsg. v. *H. Ullrich* u. *H. Werneke.* 4. Hft. In-8°, IV-107 p. av. 19 fig., 1 pl. et 1 carte. Freiberg, Craz u. Gerlach. 3f,75.

Wabner (R.). — Die Bewetterung der Bergwerke. In-8°, XII-250 p. av. atlas in-4° de 30 pl. Leipzig, A. Felix. 20 fr.

Westphal (J.). — Geschichte des königl. Salzwerks zu Stassfurt unter Berücksichtigung der allgemeinen Entwickelung der Kaliindustrie. Denkschrift aus Anlass des 50 jähr. Bestehens des

Digitized by Google

Stassfurter Salzbergbaus. Im amtl. Auftrage verf. (Extr. de la *Zeitschr. f. d. Berg-, Hütten- u. Salinenwesen im preuss. Staate.*) In-4°, IV-91 p. av. 9 pl. Berlin, W. Ernst u. Sohn. 7f,50.

7° *Construction. — Chemins de fer.*

BAUER (R.), A. PRASCH, O. WEHR. — Die elektrischen Einrichtungen der Eisenbahnen. Eine Anleitung zum Selbststudium der Telegraphen-, Telephon- u. elektr. Signal- Einrichungen. 2. Aufl. In-8°, XXIV-429 p. av. 318 fig. Vienne, A. Hartleben. 7f,50.

BOUSSE (E.). — Die Gewichtsberechnung der Eisenkonstruktionen. Zum Gebrauch im Brücken-, Eisenhoch- u. Schiffbau, sowie im Hütten- u. Maschinenbaufach. In-8°, V-104 p. av. 58 fig. Leipzig, Th. Thomas. 7f,50.

BROSIUS (J.) u. R. KOCH. — Die Schule des Locomotivführers. Gemeinfasslich bearb Mit e. Vorwort von *E. Heusinger v. Waldegg*. 1. Abth. In-8°, XIV-281 p. av. 248 fig. et 1 pl. Wiesbaden, J. F. Bergmann. 4f,25.

BRUCK (R.). — Die Praxis der Locomotivheizung. In-8°, VI-80 p. av. 20 fig. Vienne, Spielhagen u. Schurich. 1f,50.

Eisenbahn-Technik, die, der Gegenwart. Hrsg. v. *Blum, v. Borries*, u. *Barkhausen*. III. Hd. Unterhaltung u. Betrieb der Eisenbahnen. 2. Hälfte. In-8°, XII p. et p. 245-571 av. 93 fig. et 1 pl. Wiesbaden, C. W. Kreidel. 15 fr.

EMPERGER (F. v.). — Neuere Bauweisen u. Bauwerke aus Beton u. Eisen nach dem Stande bei der Pariser Weltausstellung 1900. 1. Thl. (Extr. de la *Zeitschr. f. öst. Ingenieur- u. Architekten-Vereines*, m. e. Anh. üb. Stiegenbauten.) In-4°, 29-7 p. av. fig. et 3 pl. Vienne, Lehmann u. Wentzel. 6f,25.

KECK (W.). — Vorträge über graphische Statik m. Anwendung auf die Festigkeits-Berechnung der Bauwerke, als Anh. zu des Verf. « Vorträgen üb. Elasticitätslehre ». 2. unveränd. Aufl. In-8°, VII-99 p. av. 83 fig. et 4 pl. Hannover, Helwing. 3f,75.

KEMMANN (G.). — Zur Eröffnung der elektrischen Hoch- u. Untergrundbahn in Berlin. (Extr. de la *Zeitung d. Ver. deut. Eisenb.-Verwaltgn.*) In-4°, 55 p. av. 55 fig., 4 pl. et 1 carte. Berlin, J. Springer. 2f,50.

KOENEN (M.). — Grundzüge f. die statische Berechnung der Beton- u. Betoneisenbauten. (Extr. du *Centralbl. d. Bauverwaltg.*) In-8°, 21 p. av. 11 fig. Berlin, W. Ernst u. Sohn. 1f,25.

MEYER (W.). — Der elektrische Betrieb v. Fernschnellbahnen.

Digitized by Google

Unter Benutzung eines vor der Technical Society of New-York geh. Vortrages. In-8°, III-63 p. Halle, W. Knapp. 1f,90.

Sammlung der im J. 1900 auf dem Gebiete des Eisenbahnwesens hinausgegebenen Normalien u. Constitutivurkunden, sowie der in diesem Jahre ertheilten u. verlängerten Vorconcessionen. Bearb. vom statist. Departement im. k. k. Eisenbahn-Ministerium. In-8°, IX-383 p. Vienne, Hof u. Staatsdruckerei. 3f,75.

Schubert (E.). — Katechismus f. den Bremser-Dienst. Ein Lehr- u. Nachschlagebuch f. Bremser, Wagenwärter, Wagenmeister u. deren Anwärter. 2. nach den neuesten Vorschriften ergänzte Aufl. In-8°, VIII-188 p. av. 103 fig. Wiesbaden, J. F. Bergmann. 2f,85.

Schmid (C.). — Statik u. Festigkeitslehre. Lehrheft, nebst vielen Beispielen u. e. Aufgabensammlung f. Festigkeitslehre, elementar bearb. f. den Gebrauch an der Schule u. in der Praxis. 3. erweit. Aufl. In-4°, VIII-119 p. av. 126 fig. et 5 pl. Stuttgart, J. B. Metzler. 5 fr.

Turley (E.). — Anleitung zur statischen Berechnung armierter Betonkonstruktionen unter Zugrundelegung des Systems Hennebique. In-8°, 23 p. av. 13 fig. Leipzig, A. Felix. 1f,25.

Vandory (J.). — Verhinderung elektrischer Strassenbahn-Unfälle, welche durch Ueberfahren verursacht werden. Entwurf zur Richtschnur f. das Publikum. In-8°, 32-4 p. av. 2 pl. Budapest, L. Toldi. 1f,25.

Zacharias (J.). — Bau u. Betrieb elektrischer Strassenbahnen. Leitfaden f. Monteure, Werkmeister u. Techniker. In-12, VII-164 p. av. 142 fig. Halle, W. Knapp. 3f,75.

Zillich (K.). — Statik f. Baugewerkschulen u. Baugewerksmeister. 2. Tl. Festigkeitslehre. 2. Aufl. In-8°, VII-172 p. av. 100 fig. Berlin, W. Ernst u. Sohn. 3f,50.

8° *Législation. — Économie politique et sociale.*

Bergpolizei-Verordnung vom 28. III. 1902 üb. Betriebsanlagen auf Bergwerken. In-8°, 27 p. Essen, G. D. Baedeker. 0f,25.

Bericht über die Thätigkeit der Arbeiter-Unfallversicherungsanstalt f. Mähren u. Schlesien in Brünn f. d. Verwaltungsj. 1900. In-4°, 56 p. av. 1 pl. Brünn, R. M. Rohrer. 2f,50.

Moritz (E.). — Eisenindustrie, Zolltarif u. Aussenhandel. Ein prakt. Beitrag zur Wirtschaftspolitik nach Informationen aus

Digitized by Google

Industrie- u. Exportkreisen. In-8°, IV-74 p. Berlin, F. Siemenroth. 1f,90.

ZACHER. — Die Arbeiter-Versicherung im Auslande. 14. Hft. In-8°, 69 p. Berlin, A. Troschel. 2f,50.

9° *Objets divers.*

BECK (L.). — Geschichte d. Eisens. V. Abtlg. 3-6. Lfg. Braunschweig, Vieweg. Chaque fascicule, 6f,25.

DUNBAR u. K. THUMM. — Beitrag zum derzeitigen Stande der Abwasserreinigungsfrage m. besonderer Berücksichtigung der biologischen Reinigungsverfahren. In-8°, VII-142 p. Münich, R. Oldenbourg. 5 fr.

GLEICHEN (A.). — Geometrische Konstruktionen neben der Methode der Durchrechnung bei photographischen Objektiven. (Extr. de *Der Mechaniker.*) In-4°, 5 p. av. fig. Berlin, Administration der Fachzeitschrift *Der Mechaniker.* 0f,75.

GGAUER (K.). — Die Preisbewegung v. Chemikalien seit dem J. 1861. (Extr. de *Samml. chem. u. chem.-techn. Vorträge.*) In-8°, IV-107 p. Stuttgart, F. Enke. 4f,50.

LÖSCHNER (H.). — Genauigkeitsuntersuchungen f. Längenmessungen mit besonderer Berücksichtigung e. neuen Vorrichtung f. Präcisions-Stahlbandmessung. In-8°, 56 p. av. 15 fig. Hannover, Gebr. Jänecke. 2 fr.

SCHMATOLLA (E.). — Rauchplage u. Brennstoffverschwendung u. deren Verhütung. In-8°, VI-84 p. av. fig. Hannover, Gebr. Jänecke. 3f,15.

STAMPFER (S.). — Theoretische u. praktische Anleitung zum Nivellieren. 10. Aufl., umgearb. v. *E. Dolezal.* In-8°, XIV-308 p. av. 86 fig. Vienne, C. Gerold's Sohn. 7f,50.

STOERMER (M.). — Untersuchungsmethoden der in der Thonindustrie gebrauchten Materialien, m. besond. Berücksicht. der häufig auftretenden Fabrikationsfehler, deren Ursachen u. Verhütung. 2. verb. Aufl. v. « Die Fehler bei der Thonwaren-Fabrikation u. deren Abhilfe ». In-8°, VIII-191 p. av. 15 fig. Freiberg, Craz u. Gerlach. 7f,50.

Verhandlungen der vom 25 IX. bis 6. X. 1900 in Paris abgeh. 13. allgemeinen Conferenz der internationalen Erdmessung. Red. vom. ständ. Secr. *van de Sande Bakhuyzen.* 1. Thl. : Sitzungsberichte u. Landesberichte üb. die Arbeiten in den einzelnen Staaten. — Comptes rendus des séances de la 13e confé-

Digitized by Google

rence générale de l'association géodésique internationale, réunie à Paris du 25 IX. au 6 X. 1900. Vol. 1. In-4°, 298 p. av. 41 pl. et cartes. Berlin, G. Reimer. 7f,50.

OUVRAGES SUISSES.

Eisenbahn-Statistik, schweizerische, f. d. J. 1900. — Statistique des chemins de fer suisses pour l'année 1900. 28. Bd. Hrsg. vom schweizer. Post- u. Eisenbahndepartement. In-fol., III-235 p. Berne, H. Körber. 5 fr.

Ritter (W.). — Die Bauweise Hennebique. (Extr. de la *Schweiz. Bauzeitung.*) 3. Aufl. In-4°, 9 p. av. fig. Zürich, E. Rascher. 1f,75.

Schläfli (L.). — Theorie der vielfachen Kontinuität. Hrsg. im Auftrage der Denkschriften-Kommission der schweizer. naturforsch. Gesellschaft v. *J. H. Graf.* (Extr. des *Denkschr. d. schweiz. naturforsch. Gesellsch.*) In-4°, IV-239 p. Zürich. Bâle, Georg u. Co. 15 fr.

Studer (T.). — Die praehistorischen Hunde in ihrer Beziehung zu den gegenwärtig lebenden Rassen. (Extr. des *Abhandl. d. schweiz. paläont. Gesellsch.*) In-4°, 137 p. av. 9 pl. Zürich. 20 fr.

Übereinkommen, internationales, über den Eisenbahn-Frachtverkehr vom 14. X. 1890 m. den Änderungen u. Ergänzungen in der Zusatzvereinbarung vom 16. VII. 1895 u. in dem Zusatzübereinkommen vom 16. VI. 1898 u. Zusatzerklärung vom 20. IX. 1893, vereinbart zwischen Belgien, Dänemark, Deutschland, Frankreich, Italien, Luxemburg, den Niederlanden, Oesterreich u. Ungarn, Russland u. der Schweiz. Vom 10. X. 1901 an gült. Text, zusammengestellt vom Central-Amt in Bern in Vollziehung e. Beschlusses der Pariser Revisions-Konferenz. (In deutscher u. französ. Sprache.) 102 Doppels. m. Formularen. In-4°. Zürich, Orell Füssli. 2f,40.

Westberg (N.). — Elektrischer Betrieb auf Vollbahnen m. besond. Berücksichtigung der schweizerischen Eisenbahnen 1902. In-8°, 50 p. Berne, Polytechn. Verlagsanstalt. 0f,65.

Digitized by Google

OUVRAGES ITALIENS.

1° *Mathématiques et Mécanique pures.*

AMATO (F.-B.). — Costruzione e dimostrazione per la trisezione di qualunque angolo. Mistretta, tip. del Progresso. In-8°, 7 p. (655)

AMODEO (F.). — Stato delle matematiche a Napoli dal 1650 al 1732 : memoria. Naples, ist. tip. della R. Univ. di Tessitore e figlio. In-8°, 60 p. (Extr. des *Atti dell'Accad. Pontaniana.*) (1970)

BOUBÉE (F.-C.-P.). — Intorno all'equilibrio delle forme elastiche piane e leggermente sagomate. Naples, tip. A. Trani. In-8°, 24 p. (1260)

BRIOSCHI (F.). — Opere matematiche. Tomo II. Milan, U. Hoepli. In-4°, VIII-456 p. 25 fr. (2507)

FAIFOFER (A.). — Tavole dei logaritmi a cinque decimali da 1 a 10909 e delle funzioni trigonometriche di minuto in minuto. Venise, tip. Sorteni e Vidotti. In-16, 68 p. 1 fr. (2326)

GENOVINO (G.). — Le attrazioni del sole e della luna sul rigonfiamento equatoriale della terra e la precessione degli equinozî e la mutazione dell'asse terrestre che esse producono. Florence, tip. S. Landi. In-8°, 24 p. (2757)

GIRIODI (V.). — L'analisi indeterminata di primo grado applicata alla costruzione di un nuovo crivello di Eratostene ed alla ricerca dei minimi divisori dei numeri composti. Alba, L. Vertamy. In-4°, 32 p. (1852)

JADANZA (N.). — Elementi di geodesia. 5ª edizione. Turin, tip. C. Giorgis. In-8°, 542 p. av. fig. (173)

ORLANDO (L.). — Note di matematica. Messine, A. Trimarchi. In-16, 72 p. 2 fr. (2398)

PIERANTONI (L.-F.). — Dimostrazioni del postulato di Euclide. Chieti, tip. C. Di Sciullo. In-8°, 12 p. av. fig. (1149)

SPOLTORE (N.). — Della cicloide, delle rettificazione e quadratura del cerchio e della quadratura del circolo. Vasto, tip. M. Zaccagnini. In-8°, 10 p. (2434)

Digitized by Google

2° *Physique et Chimie.*

Battelli (A.) e Battelli (F.). — Trattato di misure e ricerche elettriche. Rome, soc. edit. Dante Alighieri. In-8°, xxxiv-1210 p. 20 fr. (1243)

Benedetti (R. de). — Considerazioni sul metodo di Neumann per il dosamento del ferro metallico nei composti di ferro ed in specie nel ferro ridotto : tesi. Turin, tip. C. Giorgis. In-4°, 20 p. (39)

Bentivoglio (G.). — Le sorgenti solforose di Saldino in Dinazzano : analisi chimica. Modène, tip. della Soc. tipografica modenese. In-8°, 10 p. et 1 pl. (1501)

Castoldi (A.). — Reattivi e reazioni : reattivi generali e speciali per l'analisi chimica, clinica e batteriologica, indicatori e carte relative esposti in ordine alfabetico secondo il loro impiego e secondo l'indicazione del nome dei rispettivi autori. Milan. tip. del Riformatorio patronato. In-16, 327 p. (723)

Fileti (M.). — Tavole di analisi chimica qualitativa. 8ª edizione, con un'appendice sui reattivi. Turin, E. Loescher. In-16, 68 p. 3f,50. (457)

Grassi (F.). — Magnetismo e elettricità : principe e applicazioni esposte elementarmente. 3ª ediz. completamente rifatta del manuale Magnetismo e elettricità di Poloni e Grassi. Milan, U. Hoepli. In-16, xvi-608 p. avec fig. et 6 pl. 5f,50. (1322)

Grimaldi (S.). — Sulla determinazione dell'idrossilammina e della fenilidrazina nelle ossime, negli idrazoni e negli osazoni. Sienne, tip. all'insegna dell'Ancora. In-8°, 7 p. (1588)

Masini (A.). — Sul fenomeno de' radioconduttori. Bologne, Regia tip. In-8°, 23 p. (2796)

Lucchini (V.). — Tabella dei pesi atomici secondo la commissione della società chimica tedesca : pesi molecolari delle principali combinazioni inorganiche ; fattori per il calcolo delle analisi. Milan, tip. del Riformatorio patronato. In-8°, 13 p. (1605)

Naccari (A.). — Lezioni di fisica sperimentale, redatte dal dott. *O. Scarpa.* Parte I : Calore. Turin, tip. Giorgis. In-8°, 309 p. av. fig. (1123)

Serra (F.). — Sul metodo di Joubert per trovare il coefficiente d'autoinduzione e analisi della curva di una forza elettromotrice alternativa. Florence, tip. G. Civelli. In-8°, 15 p. (1186)

Digitized by Google

TELESCA (G.). — Della velocità del suono : monografia. Parte I-II. Matera, tip. F. P. Conti. In-8°, fasc. 2; 63-43 p. (2441)

VILLARI (E.). — Lezioni di fisica sperimentale. Magnetismo ed elettricità. Parte II (Galvanismo ed elettromagnetismo). Naples, Soc. coop. tipografica. In-16, IX-264 p. av. fig. (2661)

VINAJ (G.-S.). — Luce e calore : prolusione al corso di idrologia 1900-1901 nella r. università di Torino. Pérouse, Unione tipografica cooperativa. In-8°, 18 p. (1737)

3° *Minéralogie. — Géologie. — Paléontologie.*

AMICIS (G.-A. de). — Elementi di mineralogia per le scuole secondarie. 2ᵉ edizione. Turin, E. Loescher. In-8°, VIII-200 p. av. fig. 2f,50. (9)

BELLARDI (L.). — I molluschi dei terreni terziarî del Piemonte e della Liguria, descritti dal dott. *F. Sacco.* Parte XXIX. Turin, C. Clausen. In-4°, 216 p. et 29 pl. (1498)

BENTIVOGLIO (T.). — Bibliografia geo-mineralogica e paleontologica delle provincie di Modena e Reggio-Emilia, 1469-1900. Modène, tip. G. T. Vincenzi e nipoti. In-8°, 179 p. (Extr. des *Atti della soc. di naturalisti e matematici di Modena.*) (41)

CACCIAMALI (G.-B.). — Una lezione di geologia dal Cidneo, in occasione del XX congresso geologico italiano, Brescia, 1901. Brescia, tip. della Provincia. In-16, 53 p. 0f,50. (65)

Carta geologica della provincia di Vicenza (Club alpino-italiano : sezione di Vicenza). Vicence, tip. L. Fabris e C. In-8°, 110 p. (720)

FRANCO (S. Di). — Le zeoliti di Palagonia : studio mineralogico. Catane, tip. C. Galàtola. In-8°, 32 p. (1576)

GOZZAGLIO (A.). — Studî di geologia continentale sui laghi di Garda e di Iseo con una nota sul recente terremoto di Salò. Brescia, tip. F. Apollonio. In-16, 45 p. (Extr. des *Commentarî dell'Ateneo di Brescia.*) (2566)

LORENZO (G. Di). — Considerazioni sull'origine superficiale dei vulcani. Naples, tip. dell'Accademia delle scienze fisiche e matematiche. In-4°, 19 p. 1 fr. (Extr. des *Atti dell'Accad. di scienze fisiche e matematiche.*) (2099)

MARINELLI (O.). — Descrizione geologica dei dintorni di Tarcento in Friuli. Florence, tip. G. Carnesecchi e figli. In-8°, VIII-256 p. et 6 pl. 12 fr. (2380)

PARONA (C.). — Trattato di geologia : storia della terra. Fasc. 1-2. Milan, F. Vallardi. In-8° av. fig., p. 1-80. 1 fr. le fascicule. (2814)

Digitized by Google

Stoppani (A.). — Che cosa è un vulcano? Milan, L. F. Cogliati. In-16, 98 p. 0f,75. (2649)

Vinassa De Regny (P.). — Paleontologia. Milan, U. Hoepli. In-16, xii-510 p. av. fig. 5f,50. (2236)

Vita (La) nei cristalli : esposizione sommaria delle ricerche del prof. Otto von Schrön, pel dott. *X. Y.* Rome, tip. G. Balbi. In-8°, 8 p. (1739)

4° *Mécanique appliquée et Machines.*

Composizione di macchine. Fasc. I (Resistenza dei materiali e organi delle machine). Turin, lit. Salussolia. In-16 obl., 174 p. av. fig. et 14 pl. (1287)

Malfatti (V.). — Caldaie Niclausse e loro impiego a bordo delle navi da guerra. (Ministero della marina.) Rome, tip. del Genio civile. In-8°, 87 p. av. fig. 1f,50. (1101)

Perelli (G.). — Sui recipienti a vapore sottoposti a sorveglianza : nota. (Associazione fra gli utenti di caldaie a vapore in Milano.) Milan, tip. P. B. Bellini. In-8°, 46 p. (260)

Perricone (G.). — Proposta di un metodo generale per il calcolo delle superficie di riscaldo nelle caldaie a vapore. (Associazione fra utenti di caldaie a vapore della Sardegna.) Cagliari, tip. Commerciale. In-8°, 24 p. (2820)

Pontiggia (L.). — Della montatura delle cinghie di trasmissione durante il moto : istruzioni. (Associazione degli industriali d'Italia per prevenire gli infortuni del lavaro, avente sede in Milano.) Milan, tip. degli Ingegneri. In-8°, 39 p. av. fig. et 8 pl. (273)

Proposta di accettazione dei normali tedeschi per le condotture di vapore ad alta pressione. (V Riunione dei delegati delle associazioni italiane fra gli utenti di caldaie a vapore : associazioni utenti caldaie a vapore in Bologna.) Bologne, soc. coop. tip. Azzoguidi. In-4°, 12 p. (1673)

Tessari (D.). — La costruzione degli ingranaggi ad uso delle scuole degli ingegneri e dei meccanici. Turin, fr. Bocca. In-8°, xv-225 p. et 8 pl. 8 fr. (2208)

Zuppinger (W.). — Sulle turbine idrauliche moderne ed esperimenti sui loro rendimenti. Milan, tip. Guidetti e Mondini. In-8°, 16 p. (Extr. de *l'Industria.*) (1469)

Digitized by Google

5° *Applications industrielles de la physique et de la chimie. — Métallurgie.*

Bagnoli (A.). — Fisica industriale : note pratiche complementari per uso degli allievi macchinisti conduttori di caldaie a vapore. Forlì, tip. G. Medri e C. In-8°, 8 p. (994)

Belluomini (G.). — Manuale pratico del fabbro ferraio : opera necessaria ed indispensabile ai fabbri fucinatori, agli aggiustatori meccanici, armajuoli, carrozzieri, carradori, calderai, coltellinai, fumisti, costruttori di strumenti metrici, di serrature, di arnesi rurali, di ferramenti in genere ed a tutti quelli che si dilettano nei lavori in ferro ed in acciaio. Milan, U. Hoepli. In-16, VIII-242 p. av. fig. 2f,50. (1995)

Crema (C.). — Cenni sull'industria delle scorie Thomas. (Ministero di agricoltura, industria e commercio : direzione generale dell'agricoltura.) Rome, tip. Nazionale di G. Bertero. In-8°, 42 p. et 1 pl. 0f,50. (2315)

Fumero (E.). — La macchina dinamo-elettrica, come funziona e come è costruita : descrizione popolare. 2a edizione riveduta e migliorata. Turin, S. Lattes e C. In-4°, 43 p. et 1 pl. 4 fr. (467)

Gabba (L.). — Manuale del chimico e dell'industriale : raccolta di tabelle, di dati fisici e chimici e di processi d'analisi tecnica ad uso dei chimici analitici e tecnici, dei direttori di fabbriche, dei fabbricanti di prodotti chimici, degli studenti di chimica, ecc. 3a edizione ampliata, riveduta ed arricchita delle tavole analitiche di *H. Will*. Milan, U. Hoepli. In-16, XIX-457 p. 5f,50. (468)

Muro (L. de). — Alcune formule per il calcolo delle linee trifasi non equilibrate. Rome, tip. Forzani e C. In-4°, 7 p. (867)

Mussi (U.). — Metodo sollecito e pratico per la sterilizzazione dell'acqua e dei recipienti di vetro : comunicazione fatta alla società fiorentina d'igiene dell'assemblea generale del 9 agosto 1901. Florence, tip. G. Civelli. In-8°, 12 p. (231)

Nozioni sul ferro, acciaio e ghisa e sulle altre principali materie impiegate nella fabbricazione delle armi portatili. Fasc. 1. Pinerolo, tip. Sociale. In-8°, p. 1-18. (243)

Sartori (G.). — Determinazione del rendimento di grandi dinamo. Milan, tip. Bernardoni di C. Rebeschini e C. In-8°, 16 p. av. fig. (2841)

—— Il divisore di tensione per correnti alternate. Milan, tip. Bernardoni di C. Rebeschini e C. In-8°, 8 p. (2842)

Digitized by Google

SPIREK (V.). — Il forno Cermack Spirek per arrossimento e calcinazione dei minerali. Turin, tip. G. U. Cassone succ. G. Candeletti. In-4°, 24 p. et 1 pl. (332)

6° *Exploitation des mines. — Gîtes minéraux.*

FOLCO (C.). — Minières et recherches de soufre de la maison Trezza en Romagne et dans les Marches : rapport. Rome, tip. Forzani e C. In-8°, 114 p. (1575)

FROMENT (A.). — Rapport sur les mines de Borgofranco (or, argent, arsenic, plomb). Ivrée, tip. L. Garda. In-4°, 32 p. et 1 pl. (1307)

MACIOTTA (F.). — L'industria del ferro in Brasile : proposta di costituzione di una società anonima per l'acquisto e lo sfruttamento di una ricchissima miniera in ferro. Biella, tip. Trentano e Ovazza. In-8°, 8 p. (1609)

7° *Construction. — Chemins de fer.*

CHELLI (F.). — Per il traforo del Sempione : linee d'accesso complementari, fiumi e canali. Pistoia, tip. Niccolai. In-16, 32 p. et 1 pl. (1582)

8° *Législation. — Économie politique et sociale.*

BELLOC (L.). — I mezzi e gli apparecchi per prevenire gli infortunî sul lavoro in relazione alle leggi italiane. Turin, Unione tip. editr. In-4°, xv-688 p. avec fig. 20 fr. (2272)

Testo unico della legge per la tassa sulle polveri piriche e sugli altri prodotti esplodenti, r. d. 2 marzo 1902, n. 56, e regolamento 9 marzo 1902, n. 85. Milan, L. di G. Pirola. In-8°, 40 p. 0f,80. (2209)

VALDISERRA (E.). — La responsabilità civile delle ferrovie nei disastri di fronte ai viggiatori ; criteri informatori di una legge speciale limitatrice di tale responsabilità : tesi. Bologne, tip. A. Garagnani e figli. In-8°, 46 p. (955)

9° *Objets divers.*

CICERI (G.) e CONTI (G.-B.). — Navigazione e forze idrauliche nella Valtellina Inferiore : tronco Sondrio-Morbegno dal fiume di

Digitized by Google

Venina al torrente Bitto. Milan, tip. Milanese. In-4°, 58 p. et 1 pl. (89)

COLOMBO (G.). — Manuale dell'ingegnere civile e industriale. 19ª edizione modificata e aumentata. Milan, U. Hoepli. In-16, XIII-423 p. av. fig. 5f,50. (2727)

FAZI (F.). — La navigazione fluviale e lo sviluppo delle forze motrici idro-elettriche in relazione al porto di Livorno : conferenza. Livourne, tip. A. Debatte. In-8°, 36 p. (1568)

SCALINI (E.). — L'alcool denaturato in rapporto all'agricoltura e all'industria ; conferenza. Milan, tip. del Patronato. In-16, 30 p. (2182)

SINIGAGLIA (F.). — Il marchio dei metalli preziosi ; osservazioni. Florence, tip. G. Carnesecchi e figli. In-8°, 15 p. (1707)

VILLAVECCHIA (V.), FABRIS (G.) e HANNAU (C.). — Dizionario di merciologia e di chimica applicata alla conoscenza dei prodotti delle cave e miniere, del suolo e dell'industria, con speciale riguardo ai prodotti alimentari, chimici e farmaceutici. 2ª ediz. completamente riveduta, corretta ed aumentata. Gênes, A. Donath. In-8°, X-1012 p. 15 fr. (1736)

WEBBER (E.). — Dizionario tecnico in quattro lingue. I (Italiano, tedesco, francese, inglese). 2ª edizione completamente riveduta e aumentata di circa 2.000 termini tecnici. Milan, U. Hoepli. In-16, XII-553 p. 6 fr. (644)

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME PREMIER.

MINÉRALOGIE. — GÉOLOGIE.

Pages.

Contribution à l'étude géologique des gîtes minéraux de la Normandie; par M. *René Masse* 581

EXPLOITATION DES MINES. — GÎTES MINÉRAUX.

Le gisement de minerai de fer oolithique de la Lorraine; par M. *François Villain* 113
—— (*Suite et fin*) 223

Diminution des risques d'accidents dans les houillères françaises depuis 1833; par M. *Octave Keller* 565

CHIMIE. — MÉTALLURGIE.

Recherches sur les aciers au nickel à hautes teneurs; par M. *L. Dumas* 357
—— (*Suite et fin*) 447
—— Note additionnelle 609

MÉCANIQUE. — MACHINES.

Revue de la construction des machines en l'an 1900; par M. *Ed. Sauvage* (*Suite*) 70

Digitized by Google

OBJETS DIVERS.

Pages.

Recherches expérimentales sur l'écoulement de la vapeur d'eau par des tuyères convergentes et des orifices en mince paroi ; par M. *A. Rateau* 5

Note sur l'écoulement de l'eau chaude par les tuyères ; par M. *A. Rateau* 59

Statistique de l'Industrie minérale de la France. — Tableaux comparatifs de la production des combustibles minéraux des fontes, fers et aciers, en 1900 et en 1901 323

Discours prononcés aux funérailles de M. Alfred Cornu, Membre de l'Institut, Ingénieur en Chef des Mines, le 16 avril 1902 :

Discours de M. *Mascart* 335
Discours de M. le Général *Bassot* 341
Discours de M. le Général *Debatisse* 345
Discours de M. *Mercadier* 347
Discours de M. *Poincaré* 350

Digitized by Google

BULLETIN.

Pages.
Service des locomotives par équipes banales ; par M. *Gilnicki* 108
Statistique de l'industrie minérale de l'Espagne en 1900 221
Rendement comparé des machines à vapeur et des moteurs à gaz. 333
Statistique de l'industrie minérale de l'Italie en 1900..... 446
Production minérale et métallurgique des Iles Britanniques pendant l'année 1900 562
Les sources de pétrole de l'Asie Centrale 611

BIBLIOGRAPHIE.

Premier semestre de 1902.

Ouvrages français..... 613
Ouvrages anglais..... 632
Ouvrages américains..... 637
Ouvrages allemands..... 638
Ouvrages suisses..... 659
Ouvrages italiens..... 660

Digitized by Google

EXPLICATION DES PLANCHES

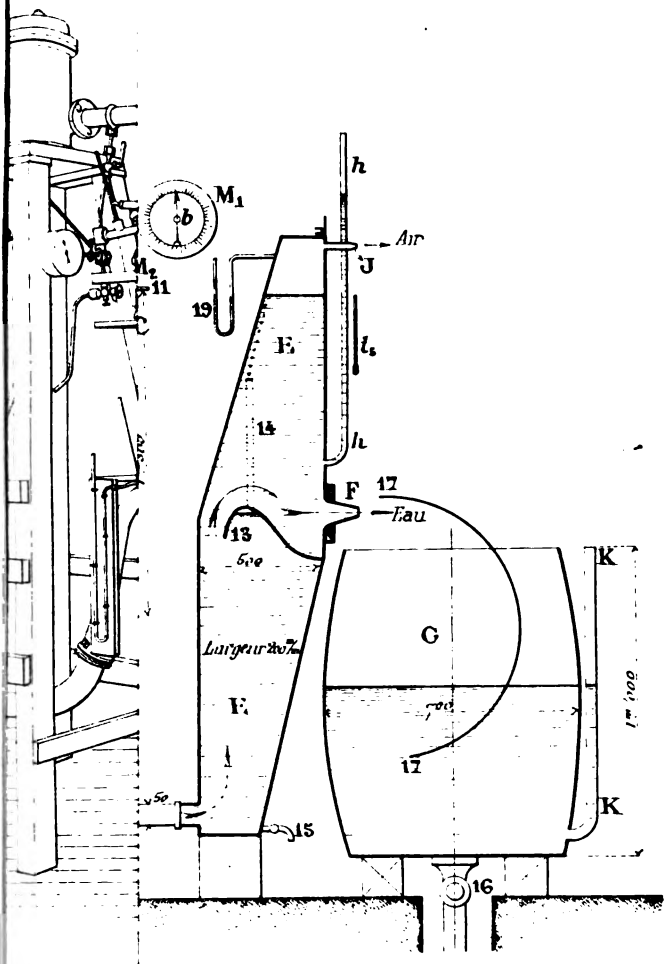
DU TOME PREMIER.

Pl. I à IV. — Recherches expérimentales sur l'écoulement de la vapeur d'eau par des tuyères convergentes et des orifices en mince paroi.
Pl. V à XII. — Gisement de minerai de fer oolithique de la Lorraine.
Pl. XIII à XV. — Contribution à l'étude géologique des gîtes minéraux de la Normandie.

Tours. — Imprimerie Deslis Frères.

Digitized by Google

xperimental



L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

Digitized by Google

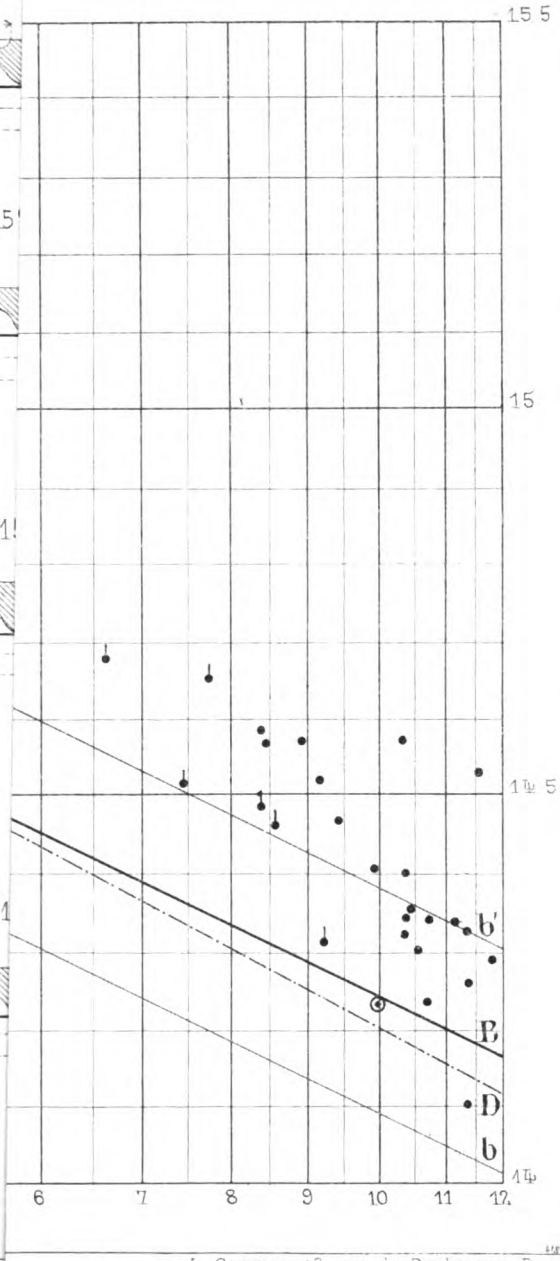
R D'EAU

e paroi

m 49 à 15

m/m 19 à 1

m/m 20 à 1



ne I, pages

L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

Digitized by Google

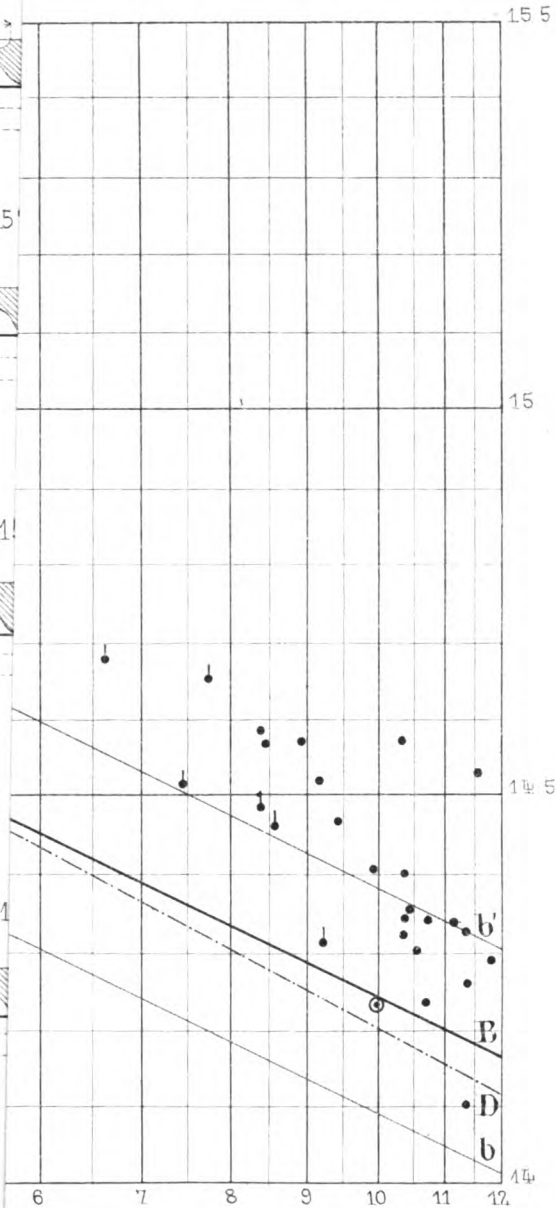
R D'EAU

e paroi

m 49 à 15'

m/m 19 à 1

m/m 20 à 1

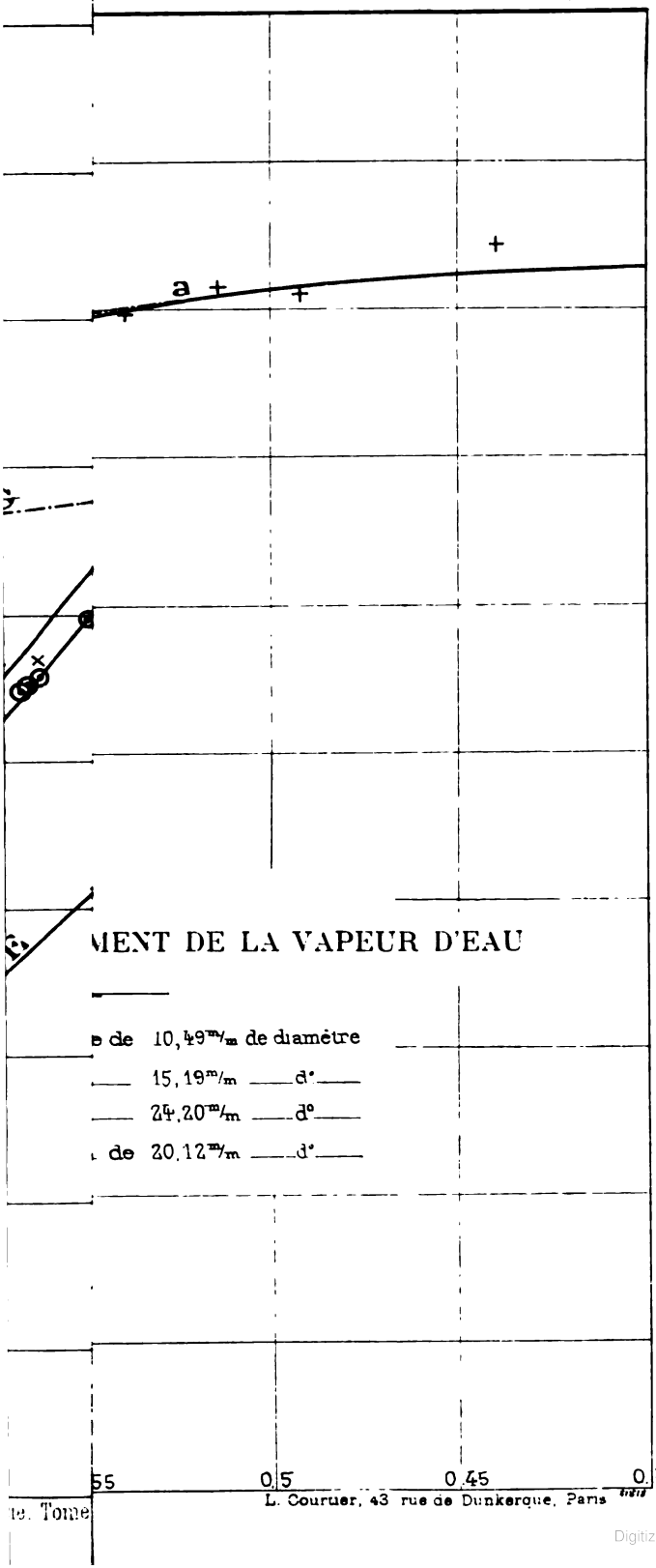


ne I, pages

L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

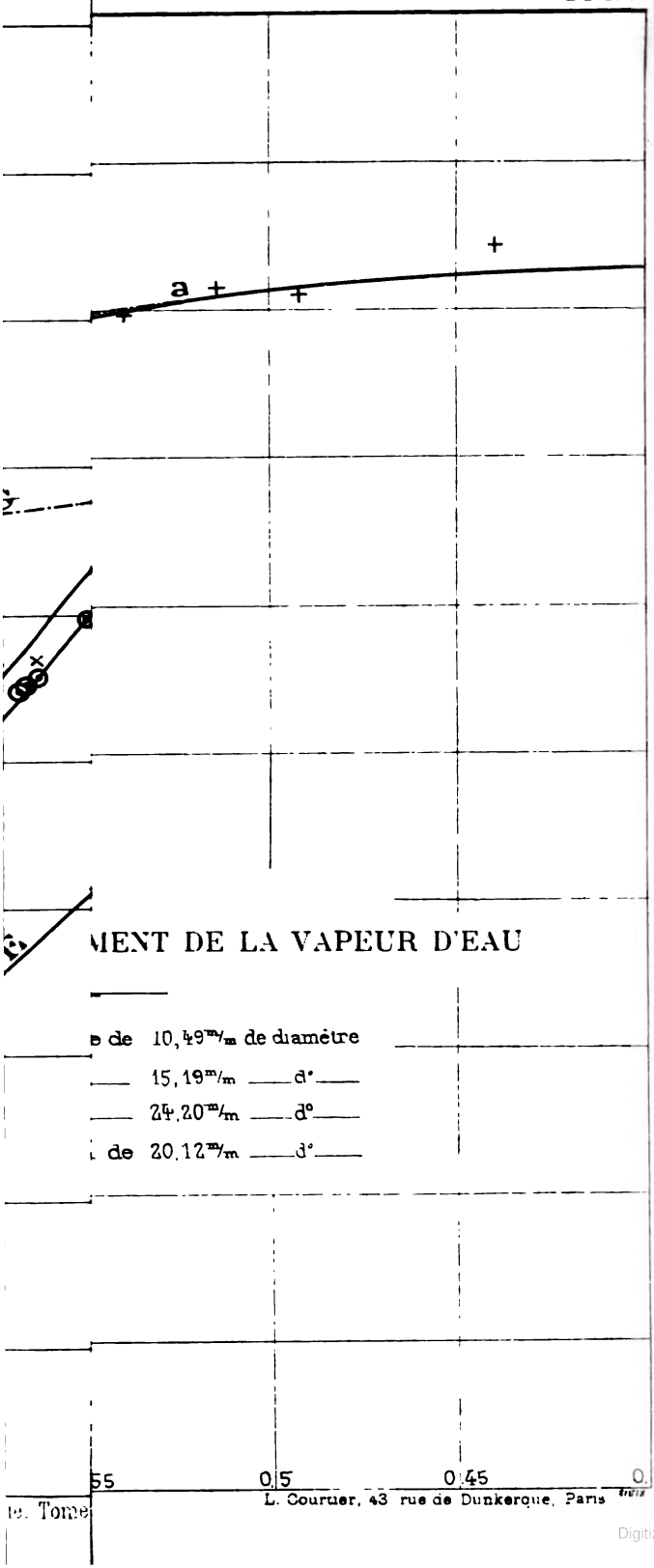
Digitized by Google

Digitized by Google



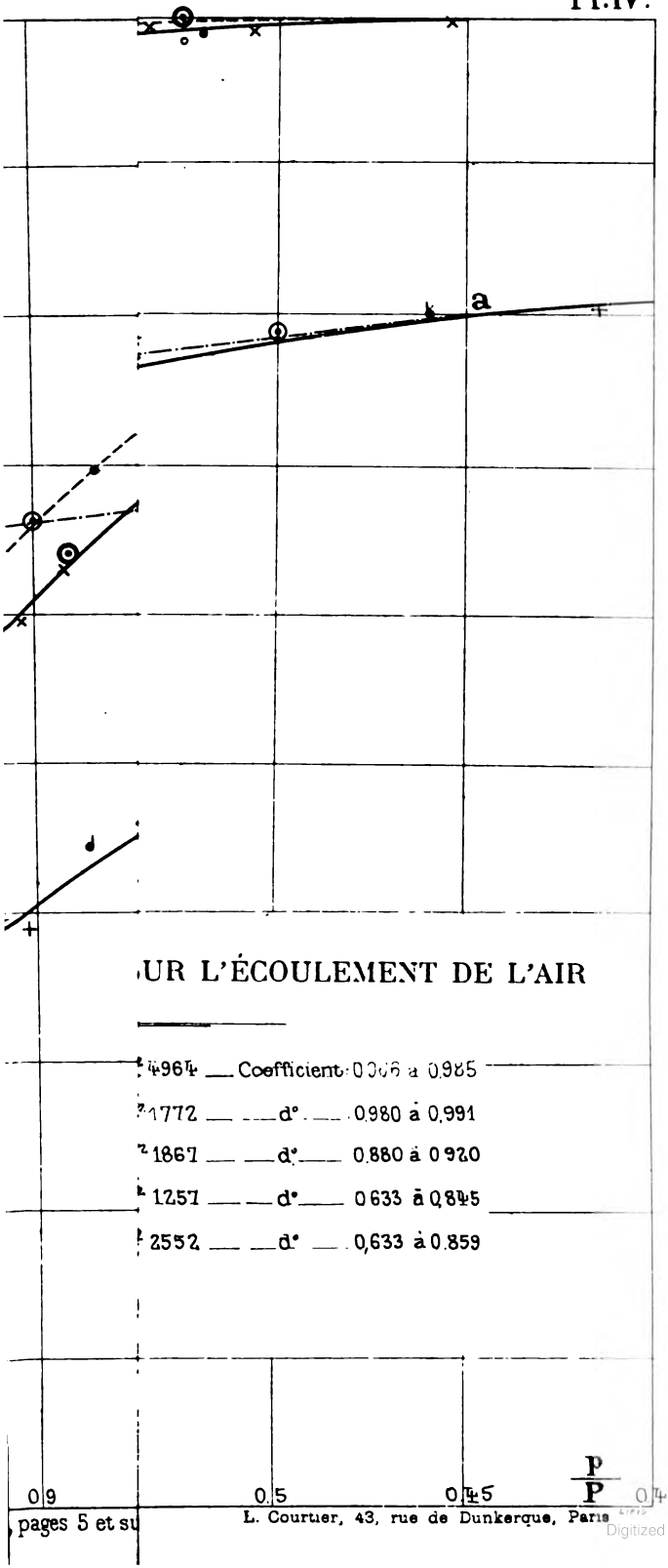
Digitized by Google

Digitized by Google



Digitized by Google

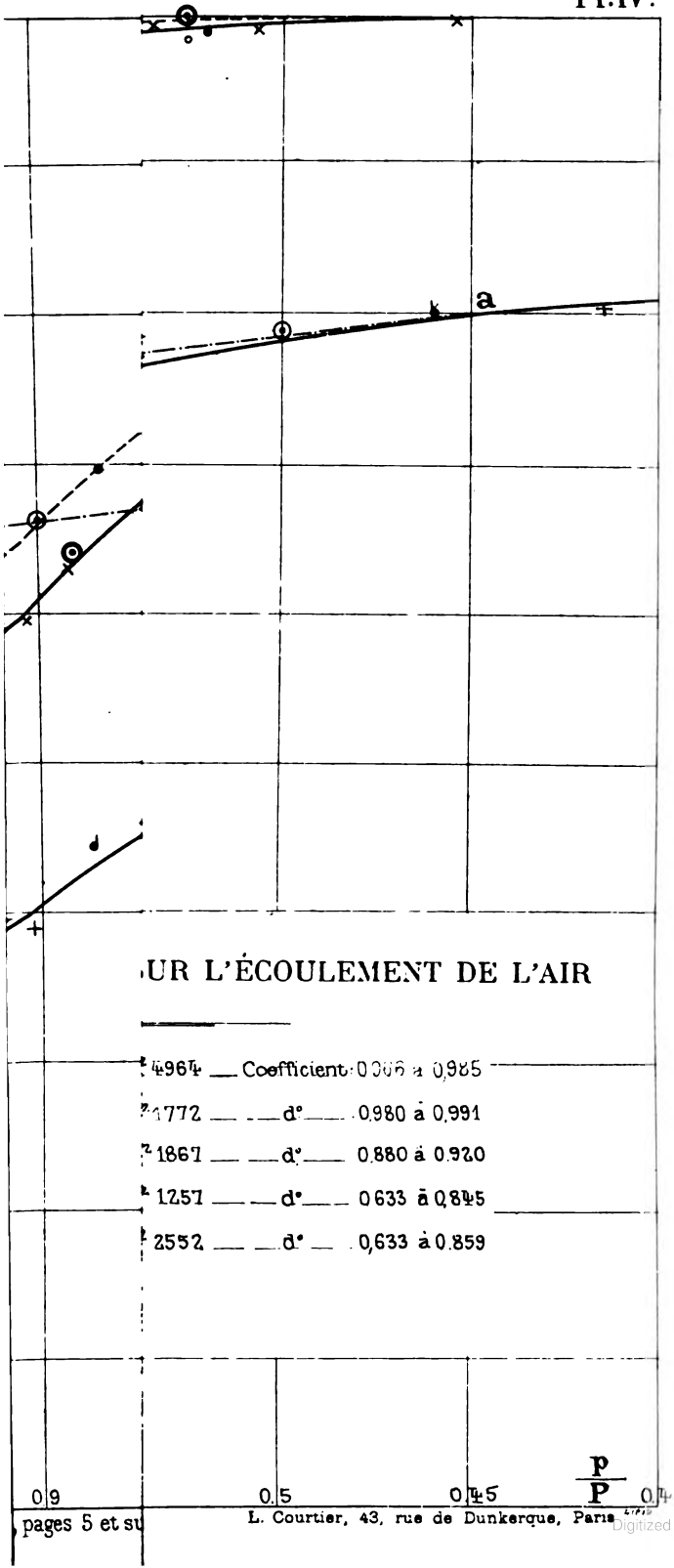
Digitized by Google



L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

Digitized by Google



L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

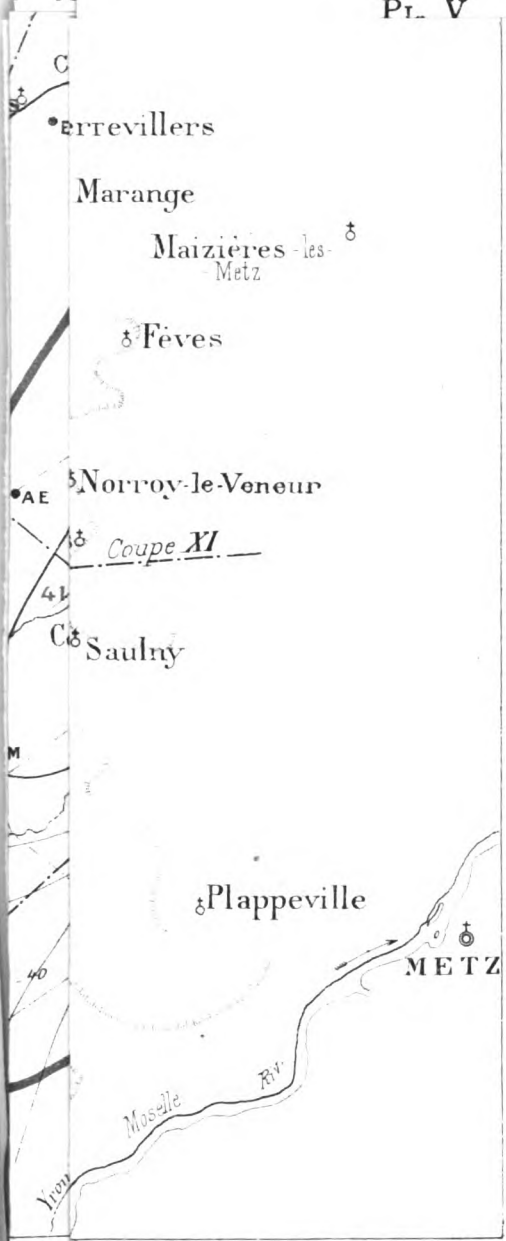
Digitized by Google

Digitized by Google

E RAINE

VI

Pl. V



Litho. J Coubé Nancy

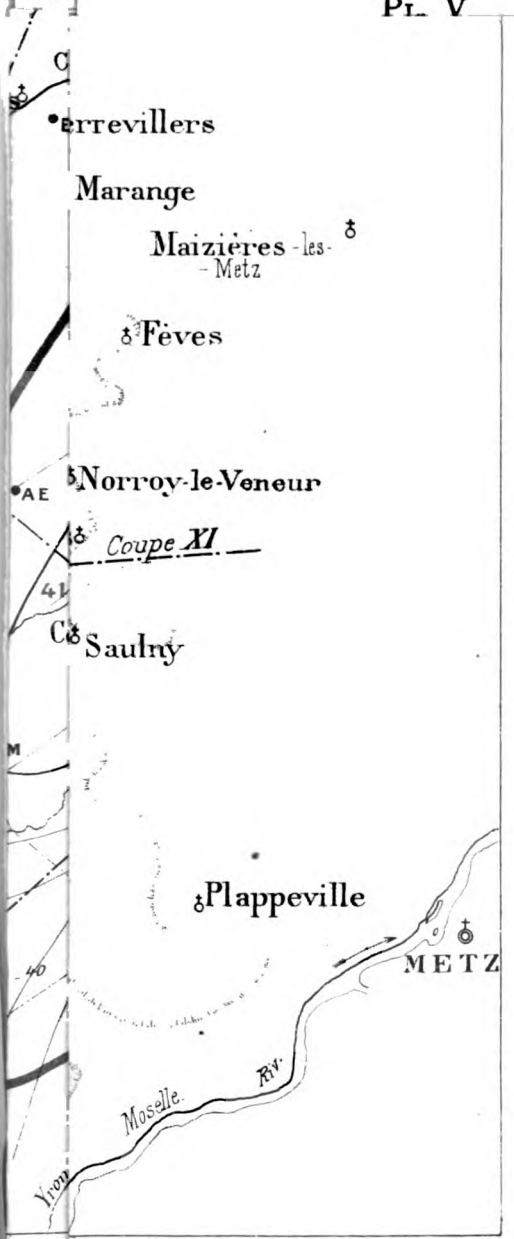
Digitized by Google

Digitized by Google

E RAINE

VI

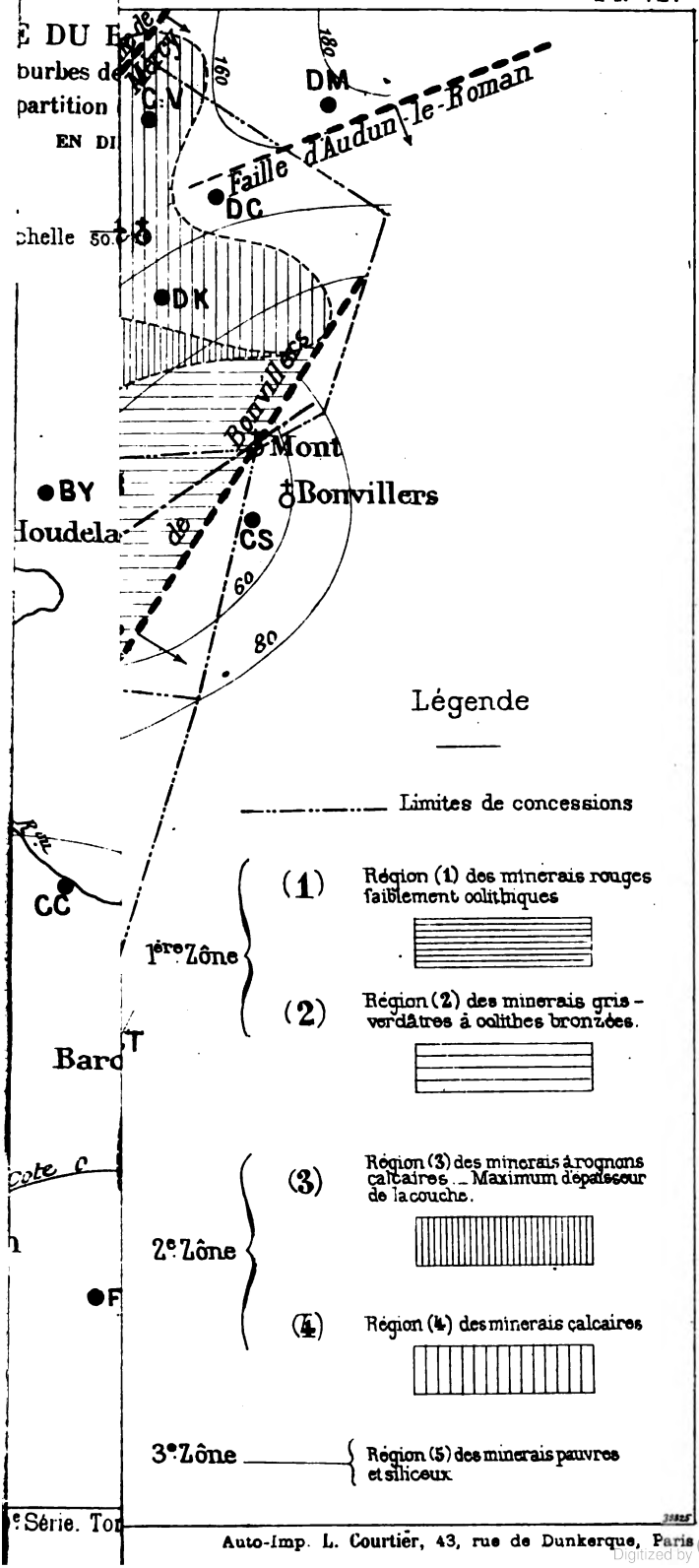
Pl. V



Litho. J. Coubé. Nancy

Digitized by Google

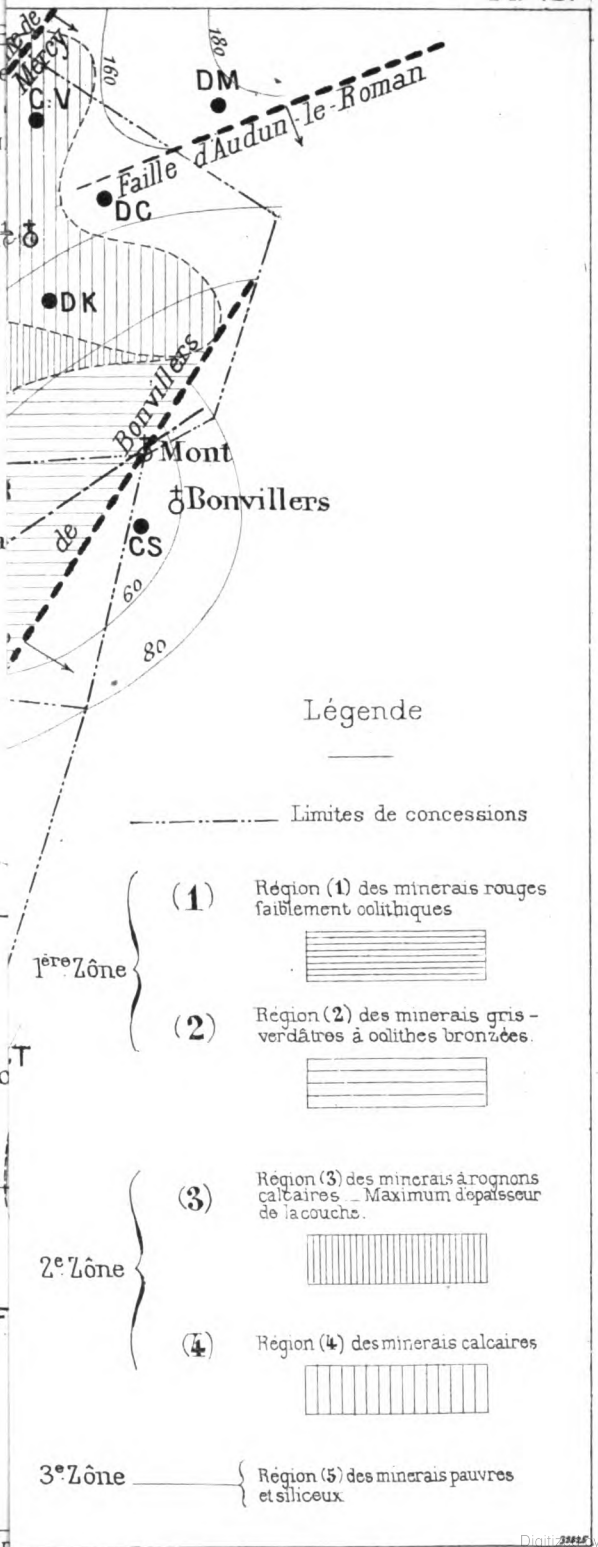
Digitized by Google



Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

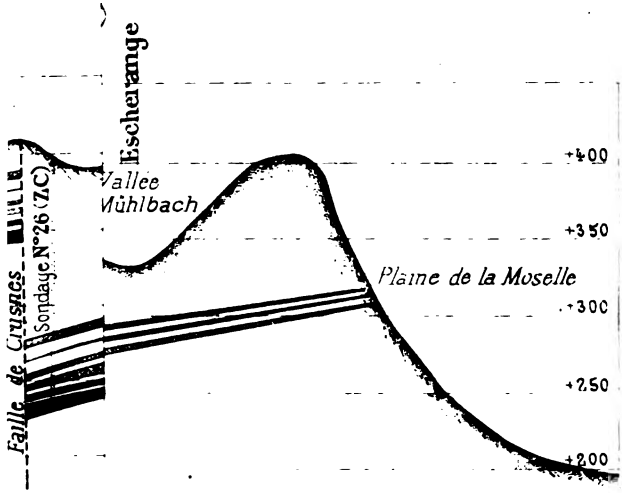
Digitized by Google

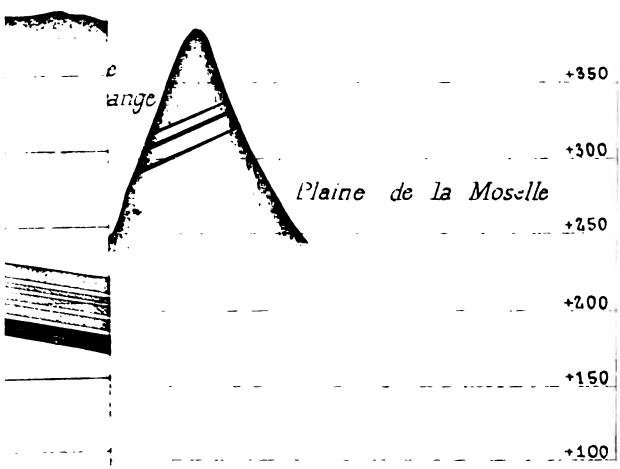


Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

Digitized by Google





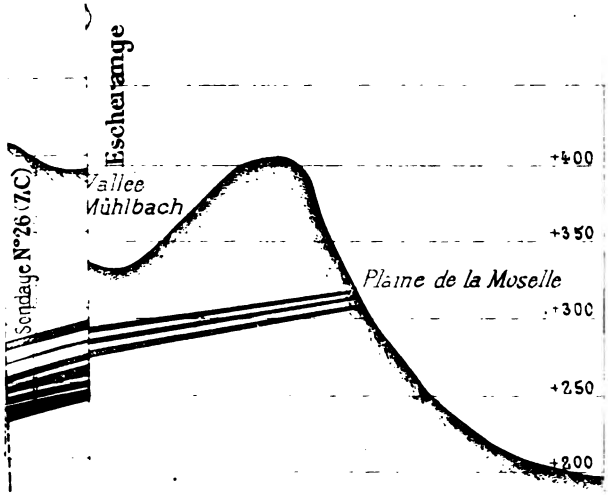
noire et
grise ja
ouge sabl

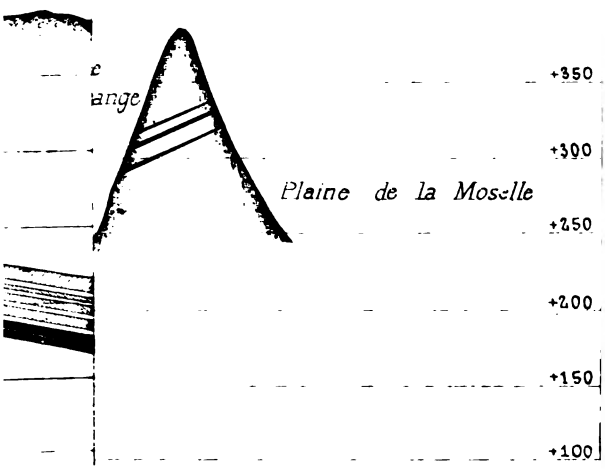
Echelle des { longueurs : 1/50000
hauteurs : 1/5000

L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

Digitized by Google





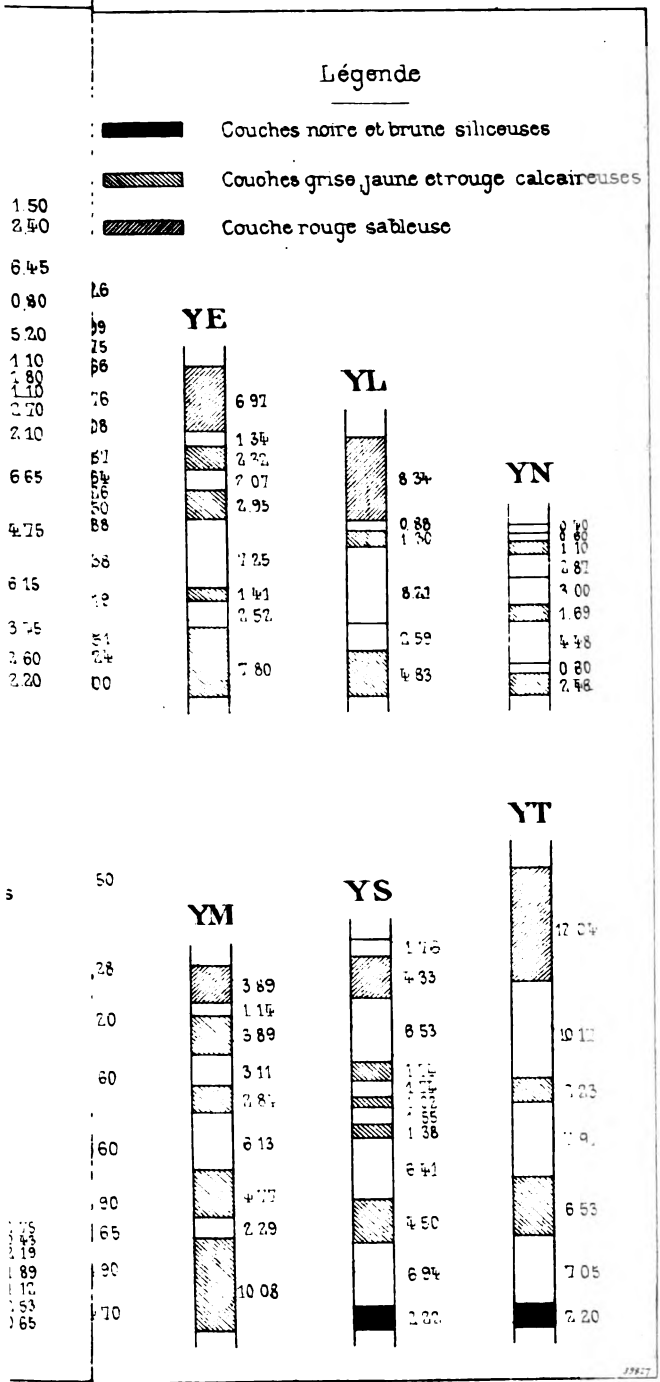
noire et
grise ja
ouge sabl

Echelle des { longueurs : 1/50000
hauteurs : 1/5000

L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

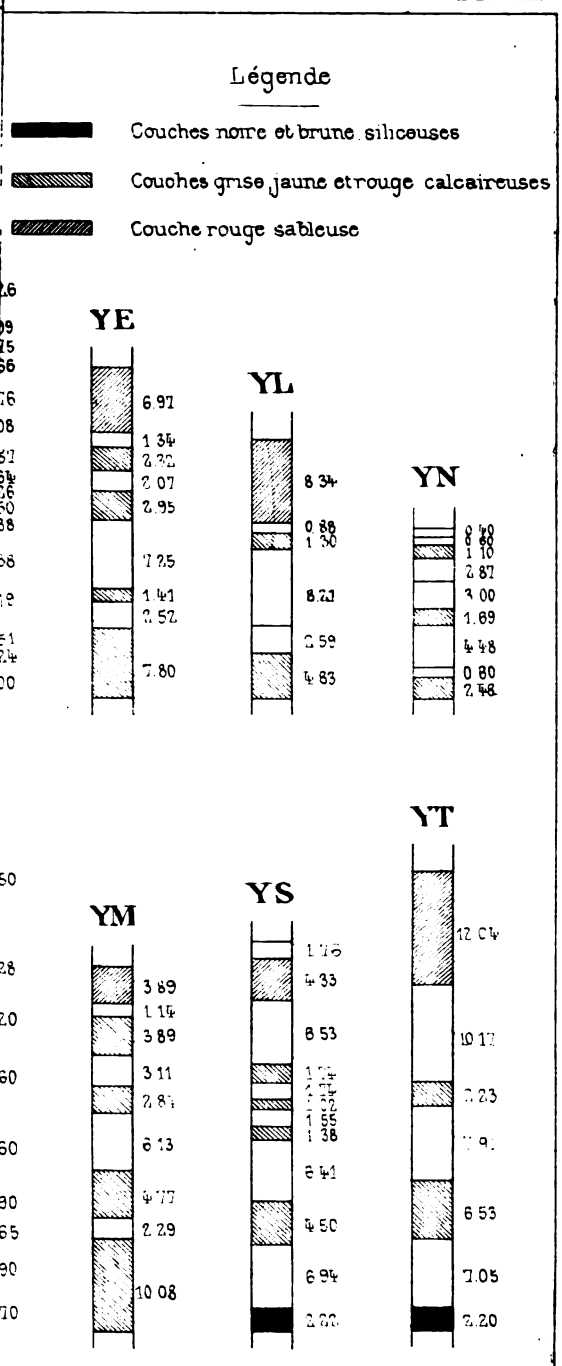
Digitized by Google



L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

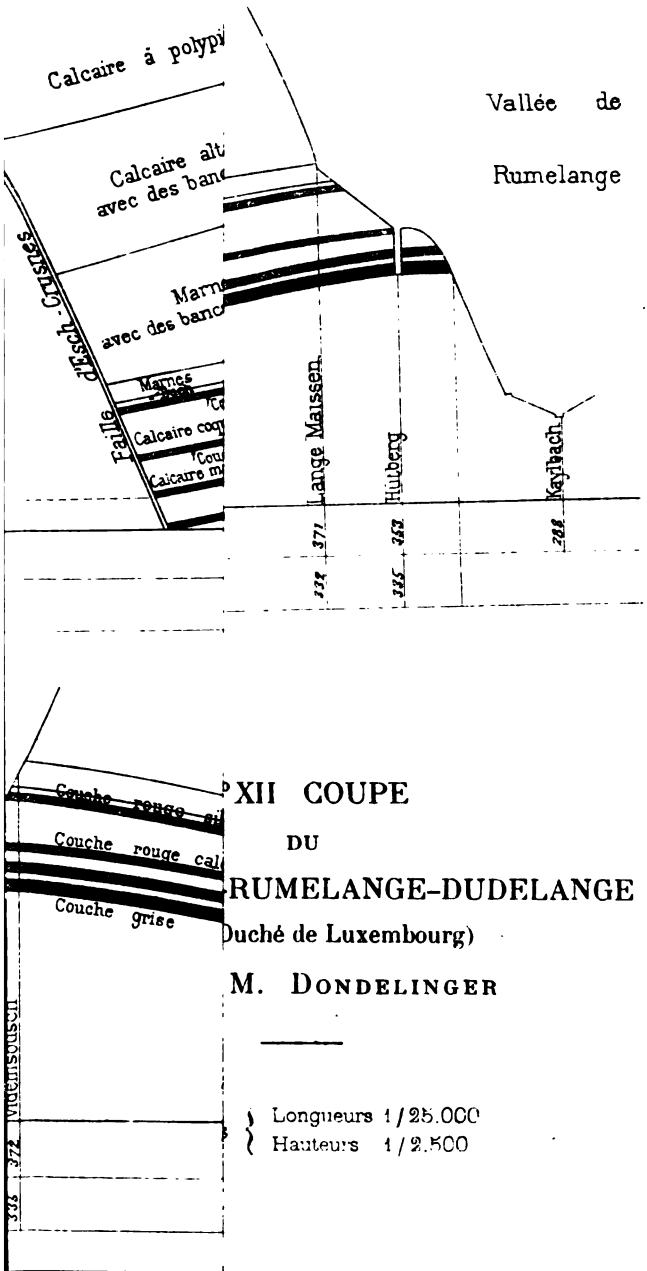
Digitized by Google



L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

Digitized by Google



XII COUPE

DU

RUMELANGE-DUDELANGE

(Duché de Luxembourg)

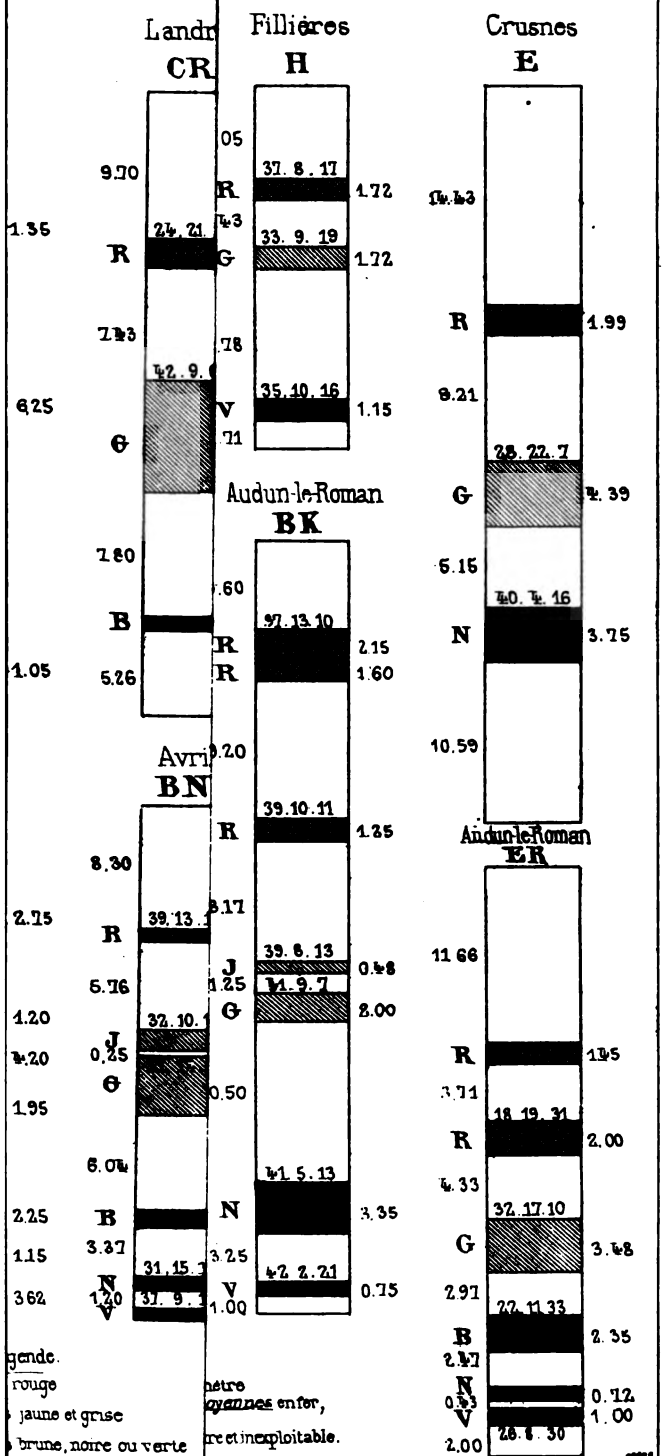
M. DONDELINGER

Longueurs 1/25.000
Hauteurs 1/2.500

L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

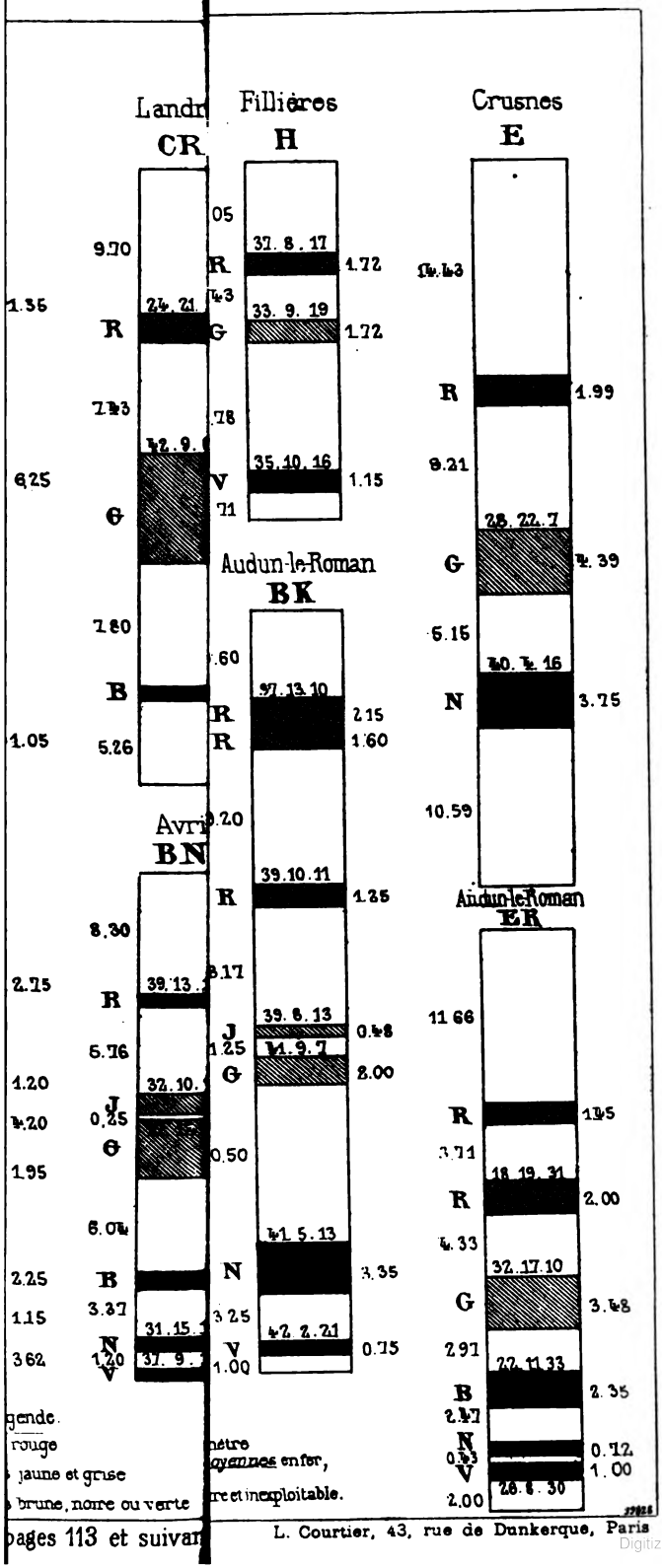
Digitized by Google



L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

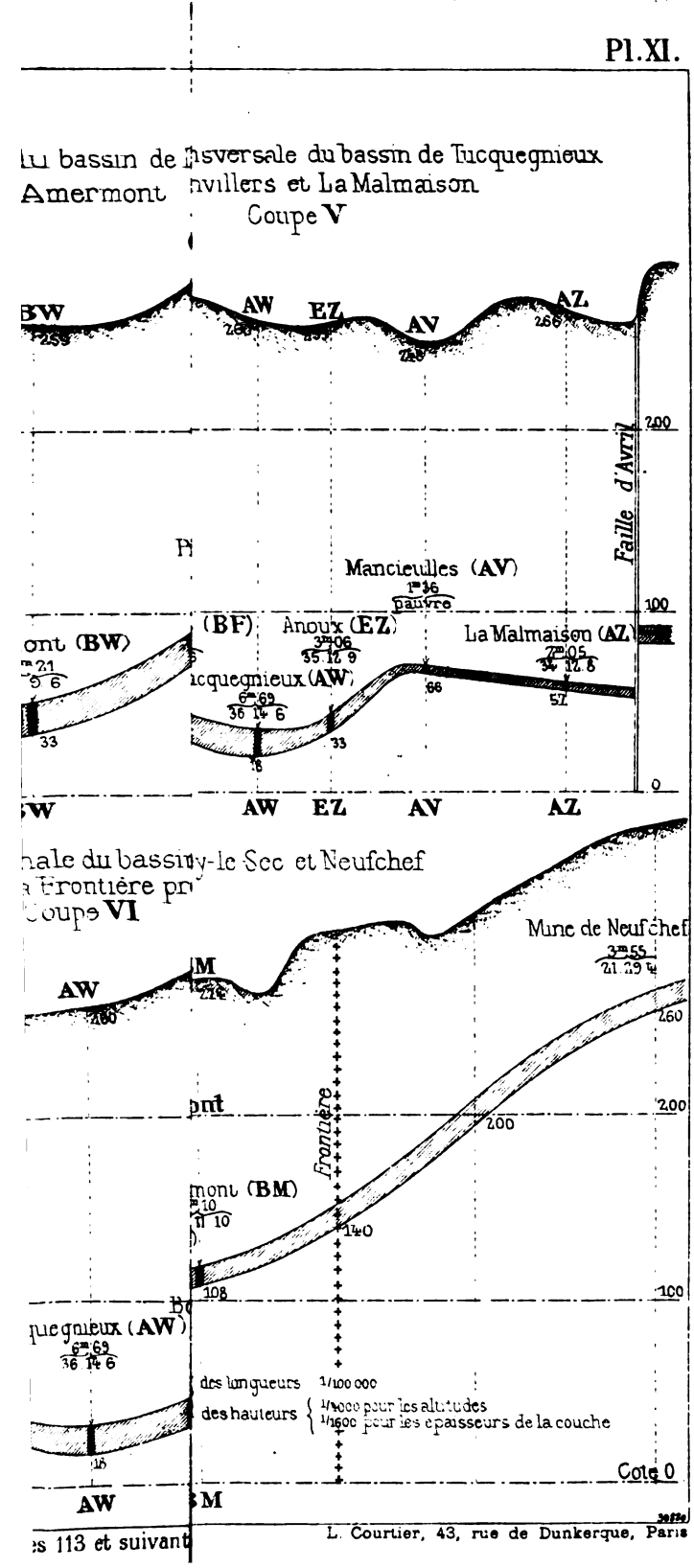
Digitized by Google



L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

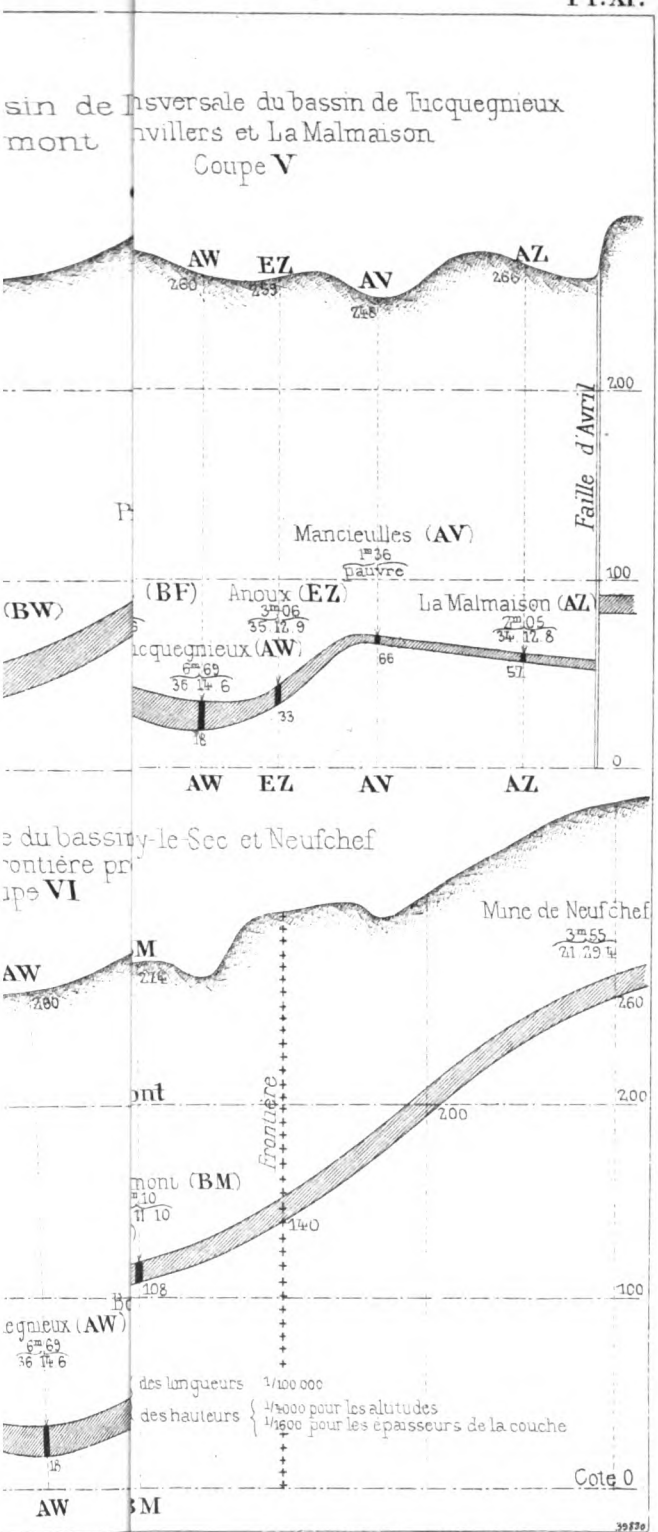
Digitized by Google



L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

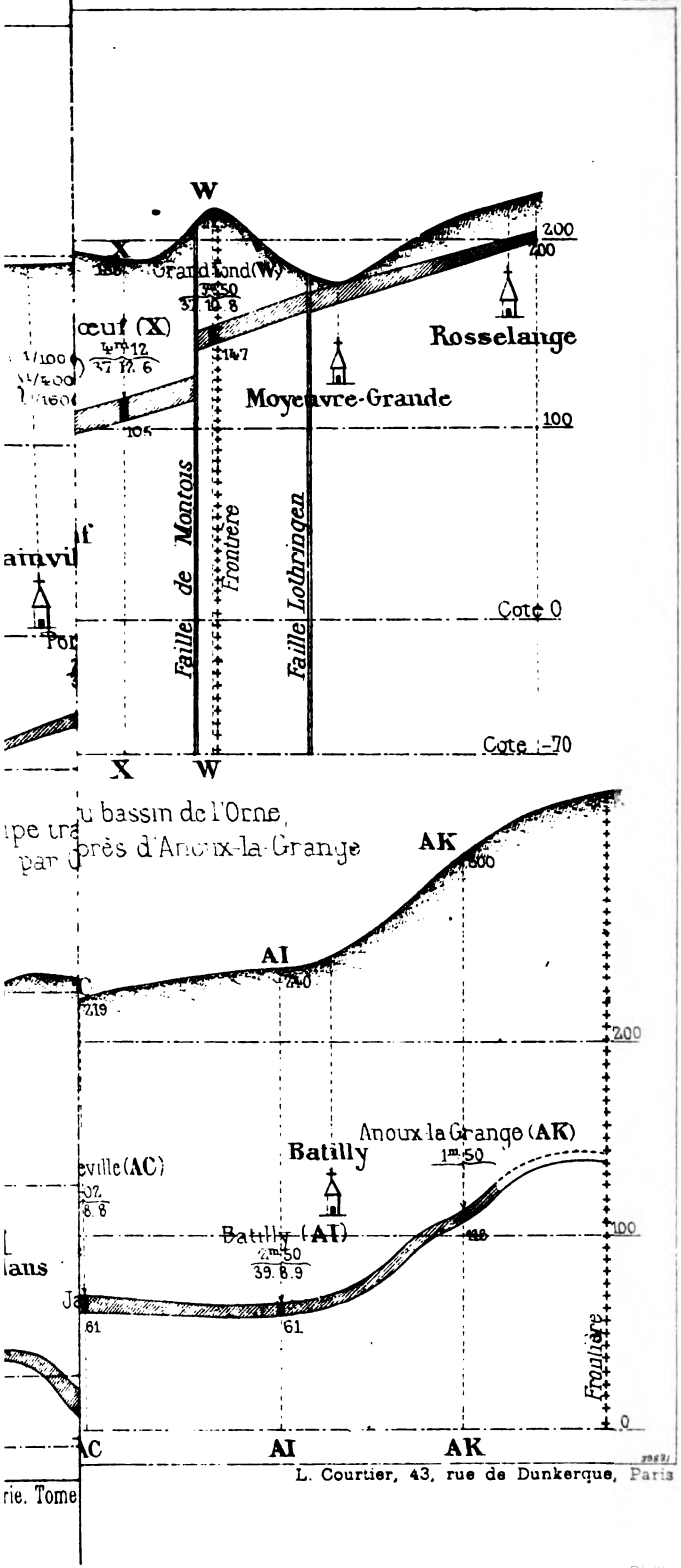
Digitized by Google



L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

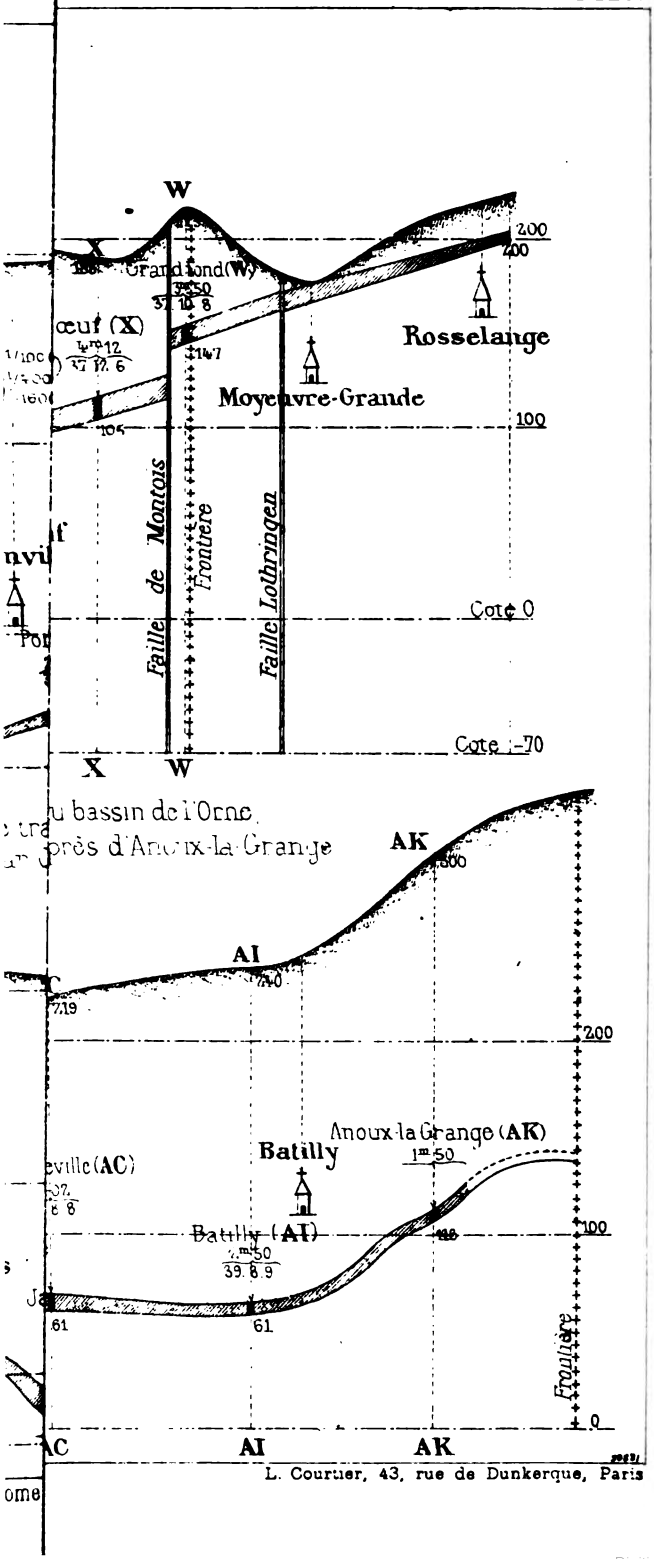
Digitized by Google

Digitized by Google



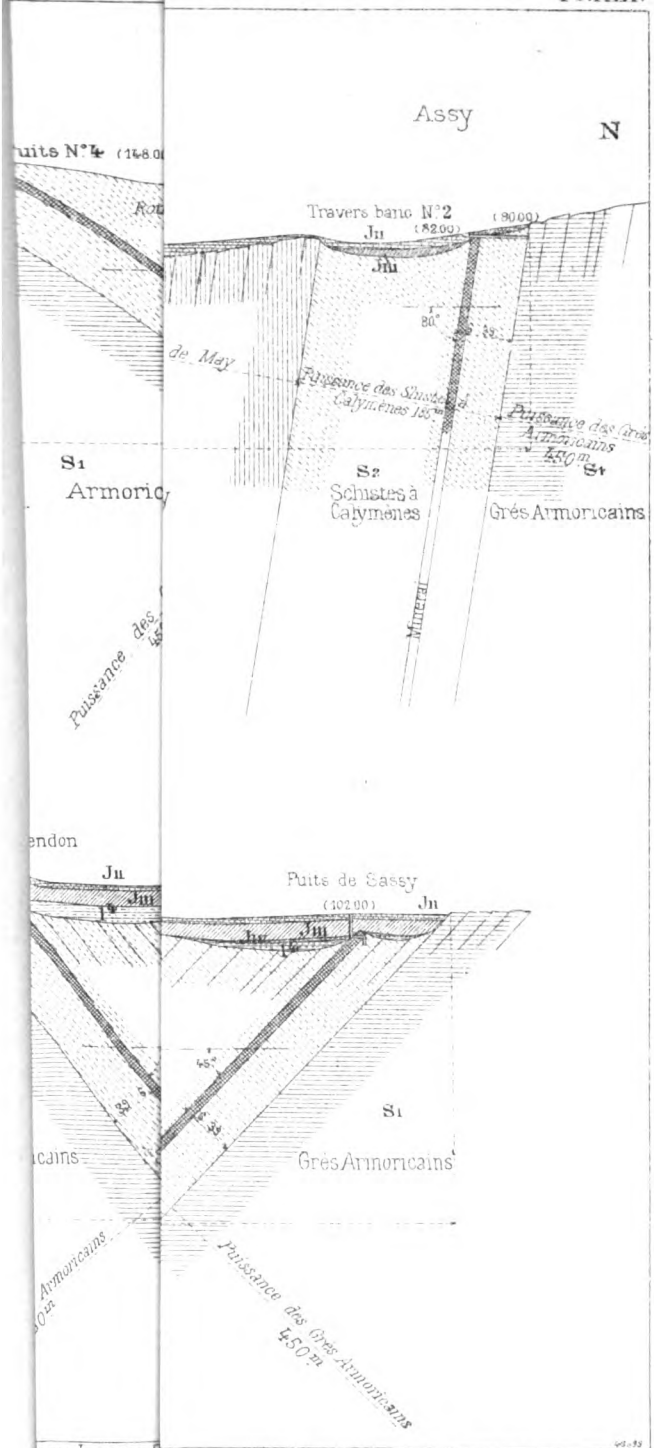
Digitized by Google

Digitized by Google



Digitized by Google

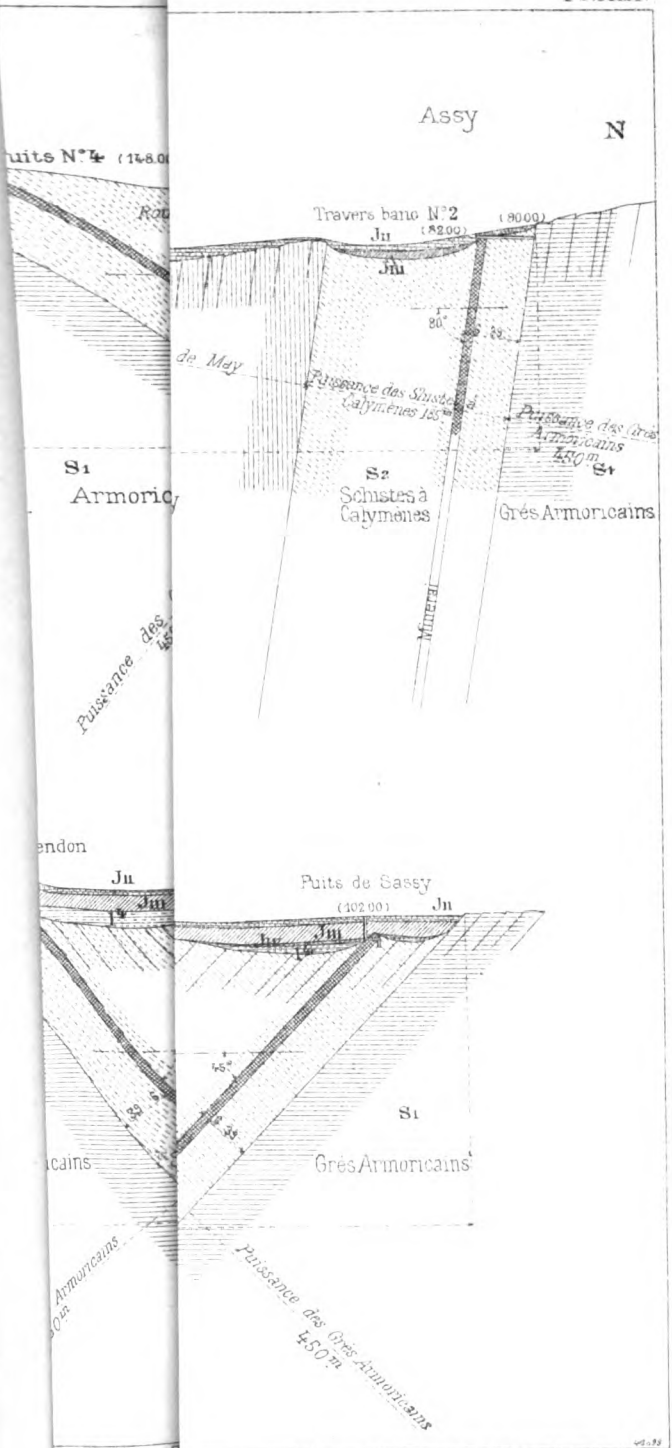
Digitized by Google



L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

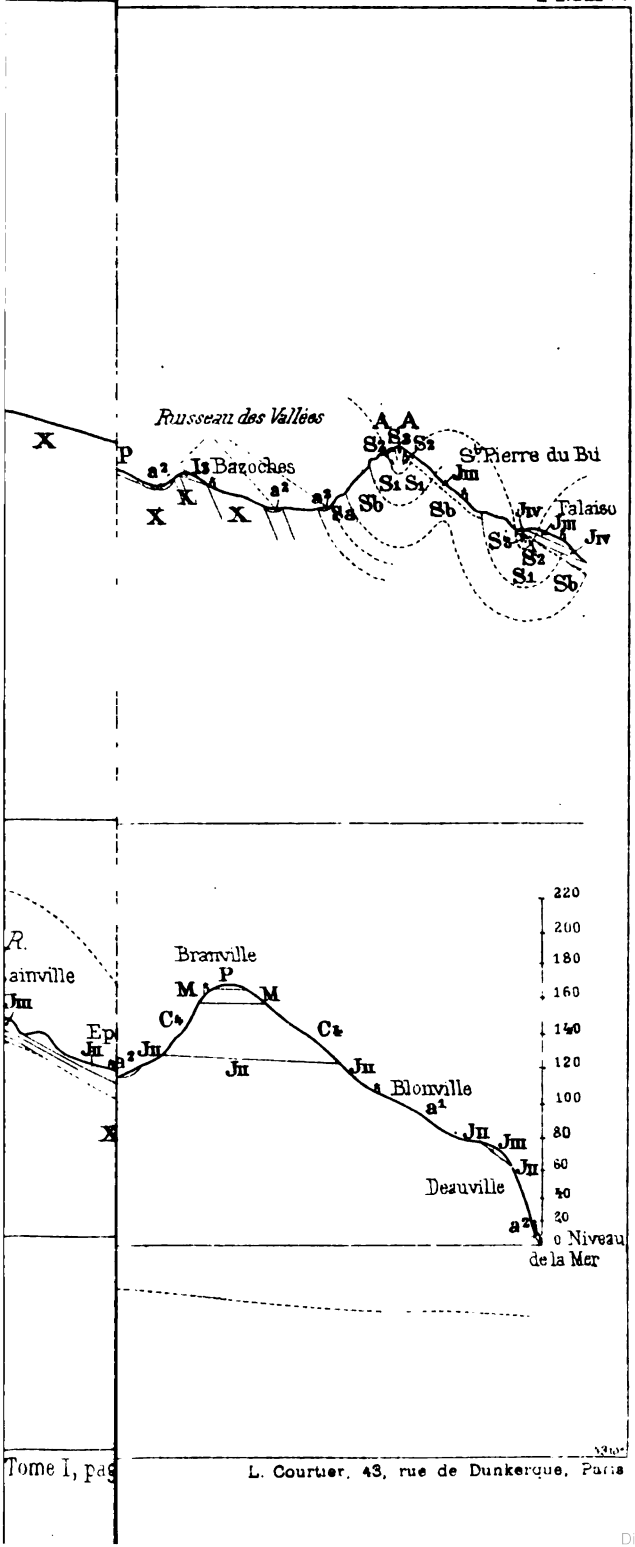
Digitized by Google



L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

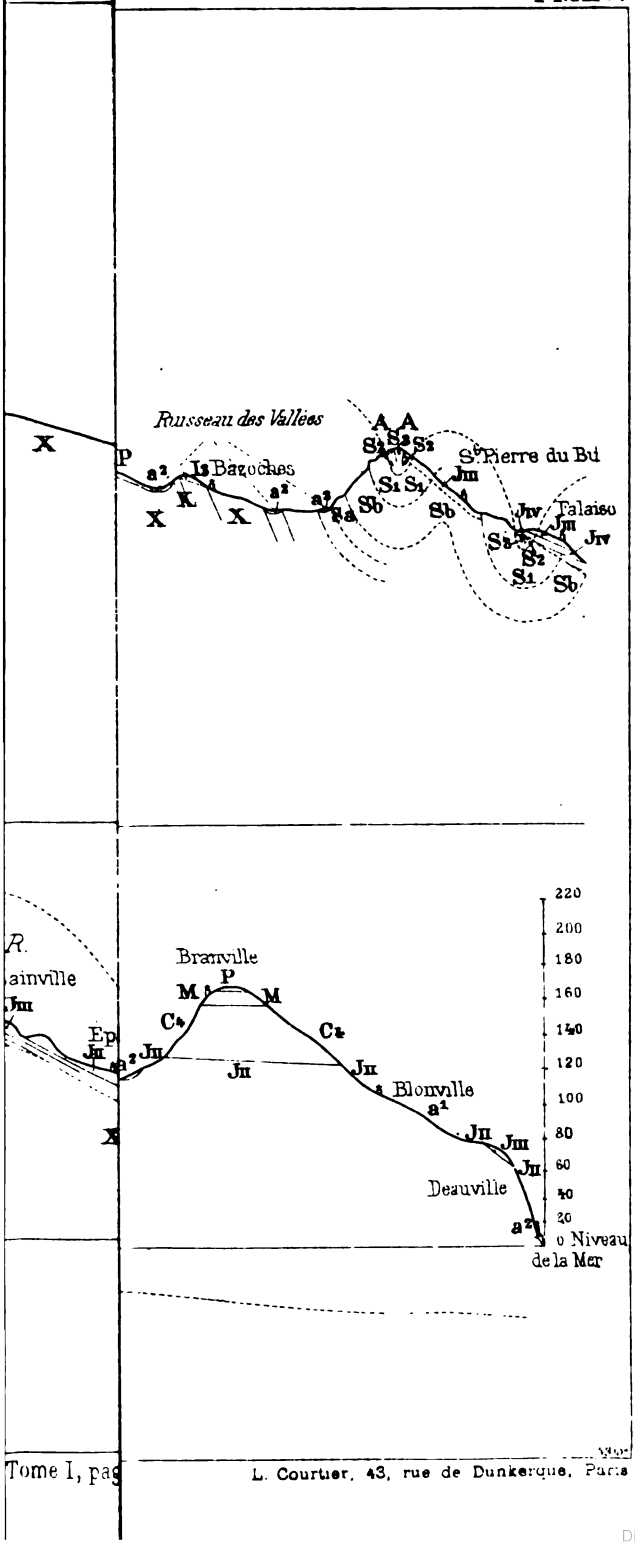
Digitized by Google



L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

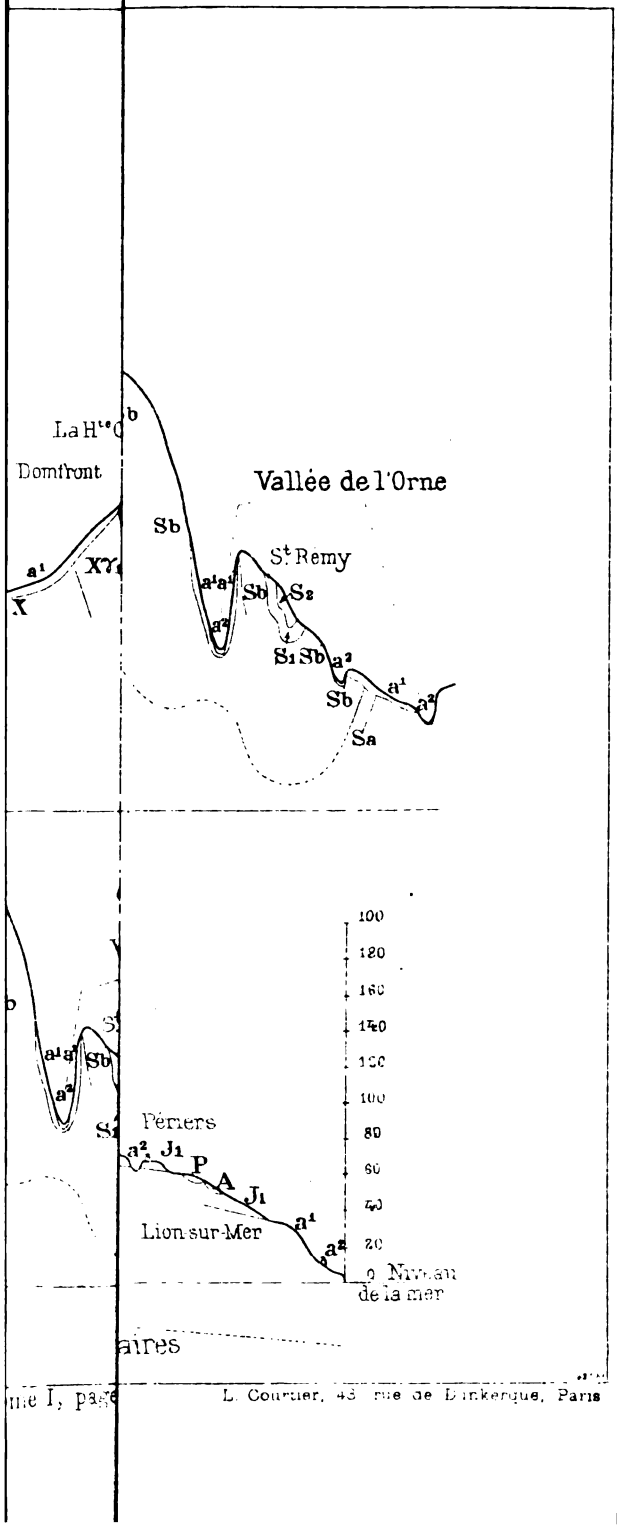
Digitized by Google



L. Courtier, 43, rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

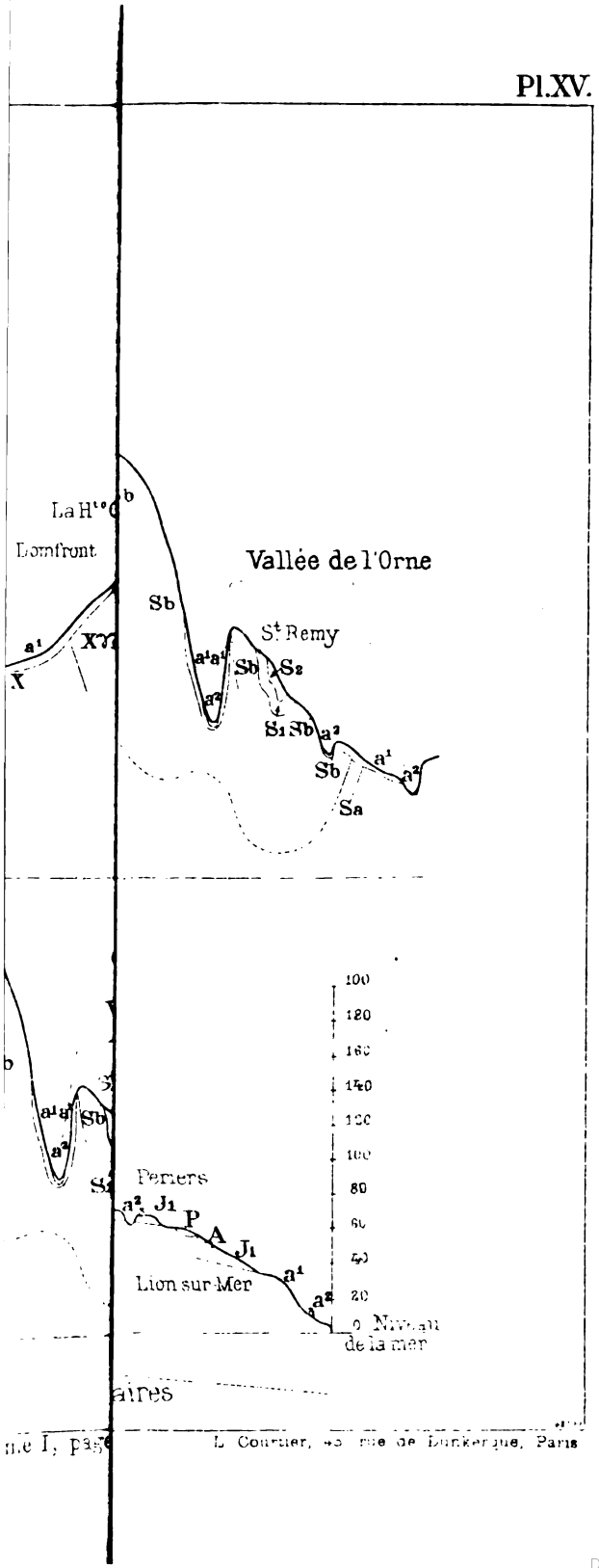
Digitized by Google



L. Courtier, 43 rue de Dunkerque, Paris

Digitized by Google

Digitized by Google



Digitized by Google

Digitized by Google

GENERAL LIBRARY
UNIV. OF MICH.
OCT 9 1902

ANNALES
DES MINES
OU
RECUEIL
DE MÉMOIRES SUR L'EXPLOITATION DES MINES
ET SUR LES SCIENCES ET LES ARTS QUI S'Y RATTACHENT
PUBLIÉES
SOUS L'AUTORISATION DU MINISTRE DES TRAVAUX PUBLICS.

DIXIÈME SÉRIE.

TOME II.

7e LIVRAISON DE 1902.

PARIS
Ve CH. DUNOD, ÉDITEUR
Quai des Grands-Augustins, 49

1902

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES.

JUILLET.

PARTIE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE.

Pages.

Étude sur les feux des mines de houille dans le bassin d'Aubin-Decazeville ; par M. *I. Abadie* 5

Commission du grisou. — Note sur l'explosion survenue à la mine « Universal » le 24 mai 1901 ; par M. *L. Aguillon* 33

Essai sur un grisoumètre électrique ; par M. *G. Léon*... 49

Expériences et théorie sur le tube de Pitot et sur le moulinet de Woltmann ; par M. *Rateau* 74

Note sur des dispositifs de sécurité à appliquer aux récipients de vapeur à couvercle amovible ; par M. *Maurice Bellom*..... 87

BULLETIN.

Statistique de l'industrie minérale de l'Autriche en 1900..... 103

Technolexique, Dictionnaire technique allemand-anglais-français publié par la Société des ingénieurs allemands..... 104

PARTIE ADMINISTRATIVE.

Juin.

Lois, décrets et arrêtés concernant les mines, carrières, sources d'eaux minérales, chemins de fer en exploitation, etc. 227

Circulaires et instructions adressées aux préfets, aux ingénieurs des mines, etc. 250

Jurisprudence 252

Personnel. 256

Digitized by Google

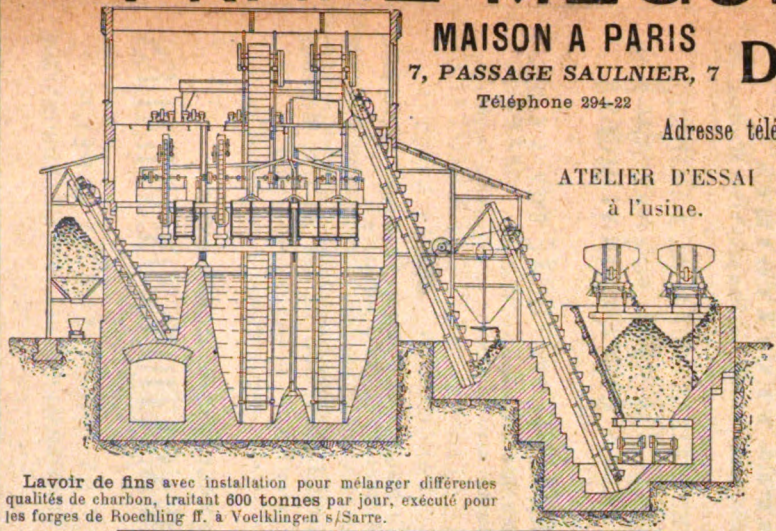
FRANZ MÉGUIN & C° (Sté Ame)

MAISON A PARIS
7, PASSAGE SAULNIER, 7
Téléphone 294-22

Dilling s/Sarre

Représentant pour la BELGIQUE :
Louis SMEYSTERS
CHARLEROI

Adresse télégraphique : **Méguin Dillingensaar**



ATELIER D'ESSAI
à l'usine.

Lavoir de fins avec installation pour mélanger différentes qualités de charbon, traitant 600 **tonnes** par jour, exécuté pour les forges de Roechling ff. à Voelklingen s/Sarre.

ÉTUDE DE **PROJETS & INSTALLATIONS** COMPLÈTES & MODERNES

— DE —

Criblage et Lavage des Charbons

INSTALLATION DE

PRÉPARATION MÉCANIQUE DES MINERAIS

Broyage avec Classement Automatique
DE TOUS GENRES

PROCÉDÉ SPECIAL POUR LA
Récupération des **FINS CHARBONS** dans les schlammes
SYSTÈME BREVETÉ

BROYEUR A COKE BREVETÉ
Grand succès en France

Machine à pilonner pour l'agglomération des charbons à coke
(BREVETÉE)
avec enfourneuse et défourneuse

Nouveau **CRIBLE GIRATOIRE**
en remplacement du crible Koxe
LE MEILLEUR APPAREIL EXISTANT, TRAVAILLANT SANS SECOUSSES ET CLASSANT MIEUX QUE TOUT AUTRE

DEMANDER PROSPECTUS

Tôles perforées

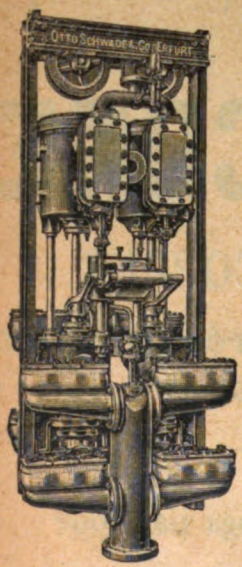
EN ACIER, FER, ZINC, CUIVRE & LAITON

Nos ateliers de perforation sont connus comme **les mieux outillés**; nous perforons des tôles jusqu'à **25 millimètres d'épaisseur et 2.500 millimètres de largeur sur 6.000 millimètres de longueur.**

Digitized by Google

OTTO SCHWADE & Cie

ERFURT (Allemagne)



Grand nombre de Pompes en magasin.

SPÉCIALITÉS :

Pompes pour l'épuisement des mines
Pompes pour mines
Pompes pour sondages
Pompes d'alimentation des chaudières
Pompes électriques pour tous usages et tous débits
Pompes à pression hydraulique
Pompes pour réservoirs
Pompes à incendie

Devis, Catalogues, etc., gratis sur demande

SPÉCIALITÉ POUR L'INDUSTRIE MINIÈRE

Lampes Électriques de Sûreté

"MAX"

CAPACITÉ. — PROPRETÉ. — LÉGÈRETÉ

ACCUMULATEURS "MAX"

Solidité à toute épreuve. — Aucun entretien

S'adresser à la Société "MAX"

187, Rue Saint-Charles, PARIS, XVe

TÉLÉPHONE : 500.41

Digitized by Google

SOCIÉTÉ GÉNÉRALE
POUR LA
FABRICATION DE LA DYNAMITE
Procédés A. NOBEL

Paris, 1900

Hors Concours. Membre du Jury

SIÈGE SOCIAL : Place Vendôme, PARIS

USINES { **à Paulilles, près Port-Vendres** (Pyrénées-Orientales).
à Ablon, près Honfleur (Calvados).

Dynamite-Gomme, pour roches très dures. — Dynamite, n° 1 guhr, n° 1 gélatinée n° 1 à l'ammoniaque, pour roches dures. — Dynamite, n° 0, pour travaux sous l'eau. — Dynamites, n° 2 et n° 3, pour terrains moins résistants.

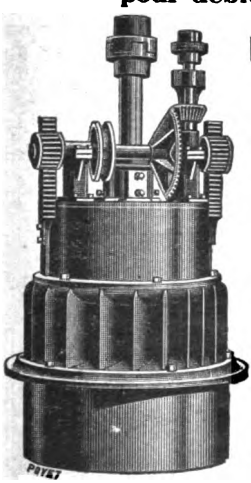
Explosifs spéciaux pour charbonnages grisouteux (Décret du 1er août 1890)

Grisoutine-Gomme pour travaux au rocher. — Grisoutine B *pour travaux dans le charbon.*

Mèches de mineurs. — Capsules pour Dynamite. — Amorces, Câbles, Fils et Appareils électriques pour sautage des mines. — Marmites suédoises ou Seaux à dégeler la Dynamite.

La Correspondance doit être adressée au SIÈGE SOCIAL

TURBINES AMÉRICA
pour débits variables hautes et basses chutes


Turbine type MC.

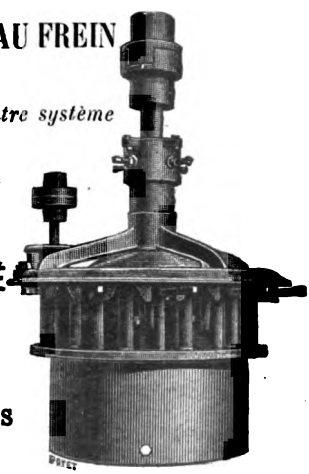
RENDEMENT GARANTI AU FREIN
80 à 85 0/0
supérieur à celui de tout autre système en usage

Les Roues sont coulées d'une seule pièce

GRANDE RÉGULARITÉ
DE MARCHE

LIVRAISON RAPIDE
Prix modérés

CATALOGUES, CIRCULAIRES
sur demande

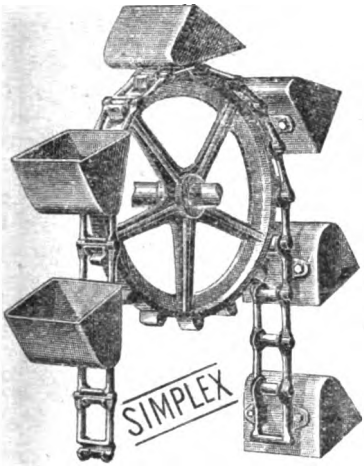

Turbine type NS.

SLOAN & Cie,
Ingénieurs-Constructeurs
17, Rue du Louvre, **PARIS**

Digitized by Google

Digitized by Google

ÉLÉVATEURS & TRANSPORTEURS



avec Chaînes Simplex

Système BAGSHAWE

Brevetées S. G. D. G.

GODETS TOLE D'ACIER

VIS D'ARCHIMÈDE

APPAREILS POUR DÉCHARGEMENTS DE BATEAUX

TRANSMISSIONS

MARQUE DÉPOSÉE

A. PIAT et ses FILS

INGÉNIEURS-CONSTRUCTEURS

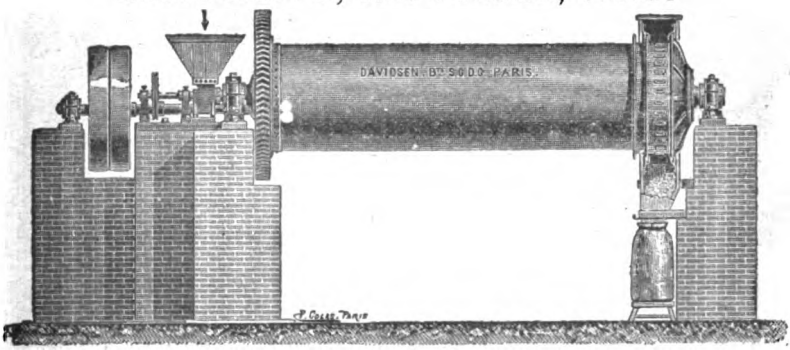
PARIS. — 85, rue Saint-Maur. — PARIS

F.-L. SMIDTH ET Cie

INGÉNIEURS CIVILS, CONSTRUCTEURS

Siège social : **Copenhague K**

Succursale : 5, Rue Fénelon, PARIS



Tube broyeur DANA

Machines et plans complets pour usines à ciment Portland et Ciment de laitier, fabriques de produits céramiques, briqueteries, tuileries

ADRESSES TÉLÉGRAPHIQUES :

Copenhague : FOLASMITH.
Paris : DAVIDSEN.
Londres : CHALKINESS.
New-York : FOLASMITH.

Digitized by Google

POMPES KLE

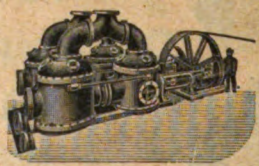
A VAPEUR, COURROIE ou ÉLECTRIQUES

POMPES " EXPRESS " JUSQU'A 300 TOURS PAR MINU

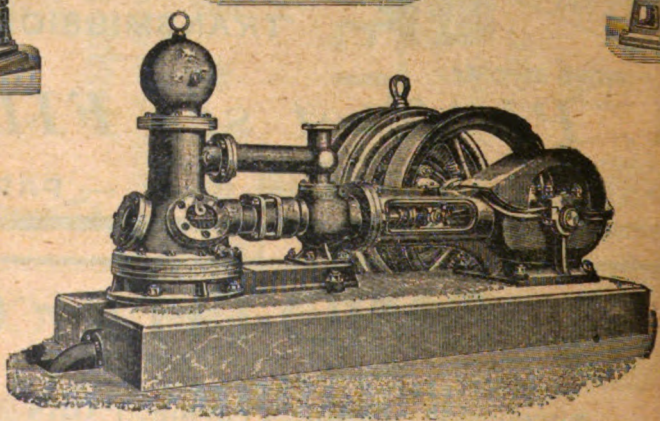
COMPRESSEURS D'AIR & POMPES A VIDE

CONDENSATION & RÉFRIGÉRANTS

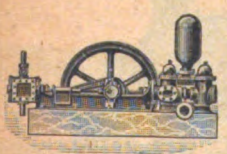
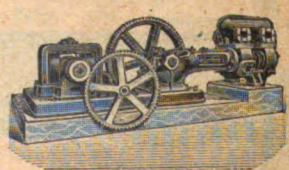
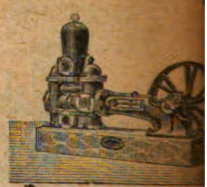
Système KLEIN, breveté S. G. D. G.



POMPES DE PUITS et de SONDAGE



pour MINES

ROBINETTERIE GÉNÉRALE pour EAU, VAPEUR et GAZ

PURGEURS AUTOMATIQUES

DIEMER, EDELMANN A.&M. & BRYLINSKI

INGÉNIEURS-CONSTRUCTEURS

Seuls concessionnaires, pour la France et Colonies, des Brevets Klein

24, Rue de l'Entrepôt. PARIS, Xe (Place de la République)

Catalogues sur demande

Digitized by Google

ÉCOLE SPÉCIALE DE TRAVAUX PUBLICS

Directeur : M. Léon EYROLLES

PARIS, Rue du Sommerard, 12, PARIS

Préparation directe et par correspondance

Aux emplois de : *Conducteur des Ponts et Chaussées, Agent Voyer, Contrôleur des Mines, Ingénieur et Conducteur de travaux, Géomètre, Architecte, et tous emplois des diverses carrières des travaux publics.*

Cours supérieur destiné à MM. les Conducteurs, Chefs de section, Agents Voyers, etc.

Préparation directe et par correspondance aux emplois d'Ingénieur

Service très important de consultations techniques et de rédaction de projets de toutes sortes

L'Ecole se charge de fournir à MM. les Entrepreneurs, Ingénieurs, etc., d'excellents Commis, Chefs de chantier, Conducteurs de travaux, etc.

Préparation aux grandes Écoles de l'État

Envoi, sur demande, d'une brochure et de renseignements détaillés

---

MAÇONNERIE ET FUMISTERIE INDUSTRIELLES

Entreprise générale de construction et d'installation d'usines

CONSTRUCTION DE CHEMINÉES EN BRIQUES ET EN TOLE

TÉLÉPHONE 924-24

M^IN DEROCHE

TÉLÉPHONE 924-24

PARIS — 21 et 23, boul. Mortier — PARIS (XXe)

Ci-devant, 21, rue Labois-Rouillon

FOURNEAUX DE GÉNÉRATEURS — MASSIFS DE MACHINES

SPÉCIALITÉ DE RÉSERVOIRS EN CIMENT ARMÉ

Devis sur demande

Lunettes d'atelier contre les éclats, les poussières, la lumière (prix : **3** fr. **50**)

Lunettes de route (automobiles, bicyclettes, etc.) (prix : **15** fr.)

Respirateur contre les poussières (prix : **6** fr.).

DU DOCTEUR DÉTOURBE

Les plus hautes récompenses.

Vente : GOULART, 35, rue de la Roquette, Paris (Notice franco).

L. DE LEZAACK

Ingénieur à Anvers, 4, rue de la Girofléé

AGENT POUR LA VENTE DES MINERAIS DE FER, PLOMB, ZINC, CUIVRE MANGANÈSE, NICKEL ET AUTRES

Atelier spécial pour l'échantillonnage des Minerais, Laboratoire de Chimie

Réception, Réexpédition, Echantillonnage et Analyse des Minerais

NÉGOCIATIONS DE CONCESSIONS MINIÈRES

Digitized by Google

SOCIÉTÉ ANONYME

HUMBOLDT

BUREAUX : 17, Boulevard Haussmann, PARIS

MATÉRIEL DE MINES

MACHINES D'EXTRACTION

MACHINES D'ÉPUISEMENT

COMPRESSEURS D'AIR ET VENTILATEURS

LOCOMOTIVES

PRÉPARATION MÉCANIQUE DES MINERAIS ET CHARBON

POMPES WORTHINGTON

WORTHINGTON.

Marque Déposée.

GRAND PRIX

Exposition Universelle

PARIS, 1889

2 GRANDS PRIX

2 Médailles d'Or

PARIS, 1900

S^TÉ FRANÇAISE DES POMPES WORTHINGTON

43, Rue Lafayette, PARIS.

Digitized by Google

EXPLICATION DES PLANCHES.

SEPTEMBRE.

Pl. IV. — Anciens chenaux aurifères de Californie.
Pl. V, VI et VII. — Havage mécanique des charbons aux mines d'Anzin.

Digitized by Google

CONDITIONS DE L'ABONNEMENT

AUX ANNALES DES MINES

Pour Paris . . . . . 20 fr. par an
Pour les Départements . . . . . 24 fr. —
Pour l'Etranger. . . . . 28 fr. —

Les ANNALES DES MINES paraissent tous les mois.

N. B. — On peut se procurer aux mêmes prix chacune des années parues depuis 1862 inclusivement.

ON TROUVE A LA MÊME LIBRAIRIE

REVUE DE MÉCANIQUE

Une livraison d'environ 100 pages gr. format avec nombreux dessins, tous les mois

Abonnement annuel : Paris et Départements. . . . . **36 fr.**
— — Étranger . . . . . **40 fr.**

La publication a commencé en janvier 1897.

REVUE G^LE DES CHEMINS DE FER ET DES TRAMWAYS

MÉMOIRES ET DOCUMENTS CONCERNANT L'ÉTABLISSEMENT, LA CONSTRUCTION ET L'EXPLOITATION TECHNIQUE ET COMMERCIALE DES VOIES FERRÉES

Abonnement pour Paris et la France. . 25 fr. par an.
— pour l'étranger . . . . . 28 fr. —

BIBLIOTHÈQUE DU CONDUCTEUR DE TRAVAUX PUBLICS

ENSEMBLE DES CONNAISSANCES INDISPENSABLES AUX CONDUCTEURS DES PONTS ET CHAUSSÉES ET CONDUCTEURS MUNICIPAUX, CONTRÔLEURS DES MINES, AGENTS VOYERS, CHEFS DE SECTION, ARCHITECTES VOYERS, ENTREPRENEURS, CONDUCTEURS DE TRAVAUX, INSPECTEURS, VÉRIFICATEURS, ETC.

publiée sous les auspices de

M. le Ministre des Travaux Publics

VOLUMES PARUS :

Mathématiques	8 fr.	50	Plantations	11 fr.	»
Physique et Chimie	8	50	Maçonneries	10	»
Bois et Métaux	8	»	Hydraulique agricole, 2e vol.	15	»
Droit civil	8	»	Menuiserie	10	»
Machines hydrauliques	10	»	Chaudières	12	»
Hygiène	7	50	Eclairage	12	»
Mécanique, Hydraulique, Thermodynamique	9	»	Topographie : Instruments	12	»
Voie publique	12	»	Comptabilité des travaux publics	12	»
Hydraulique agricole	12	»	Exploitation des mines	9	»
Organisation des services	8	»	Electricité : Théorie	12	»
Procedure civile	8	»	— Application	12	»
Charpente et couverture	10	»	Assainissement	18	»
Agriculture	9	»	Fumisterie, Chauffage	10	»
Locomotive et matériel roulant	12	»	Distributions d'eau	15	»
Photographie	9	»	Machines a vapeur	15	»
Architecture	15	»	Rôle économique et social des voies de communication	10	»
Droit administratif	9	»	Tramways et automobiles	12	»
Génie	12	»	Hydraulique agricole, 3e vol.	15	»
Législation et Contrôle des appareils à vapeur	8	»	Topographie : méthodes	15	»
Construction et Voie	12	50	Géologie et minéralogie	12	»

D'autres parties sont en préparation et paraîtront de mois en mois sous forme de volumes portatifs de 400 pages environ, format in-16, élégamment reliés.

TOURS. — IMPRIMERIE DESLIS FRÈRES.

L'Éditeur-Gérant : Vve DUNOD.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

UNIVERSITY OF MICHIGAN
3 9015 07057 5389

Digitized by Google

Digitized by Google